



TUGAS AKHIR - TF 141581

**RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI LUBANG
JALAN BERBASIS *DIGITAL IMAGE CORRELATION*
DENGAN MENGGUNAKAN SENSOR KINECT**

WAHYU ANGGORO

NRP. 02311440000093

**Dosen Pembimbing :
Dr. rer. nat. Ir. Aulia M. T. Nasution M. Sc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018**

“Halaman ini memang dikosongkan”



FINAL PROJECT - TF 141581

***DESIGN OF POTHOLE DETECTION SYSTEM
BASED ON DIGITAL IMAGE CORRELATION
USING KINECT SENSOR***

***WAHYU ANGGORO
NRP. 02311440000093***

***Supervisors :
Dr. rer. nat. Ir. Aulia M. T. Nasution M. Sc.***

***DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018***

“Halaman ini memang dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Wahyu Anggoro

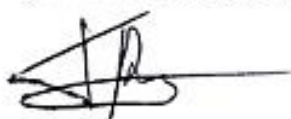
NRP : 02311440000093

Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul **"RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI LUBANG JALAN BERBASIS *DIGITAL IMAGE CORRELATION* DENGAN MENGGUNAKAN SENSOR KINECT"** adalah bebas plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 23 Juli 2018
Yang membuat pernyataan,



Wahyu Anggoro
NRP. 02311440000093

“Halaman ini memang dikosongkan”

**RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI LUBANG JALAN
BERBASIS *DIGITAL IMAGE CORRELATION* DENGAN
MENGUNAKAN SENSOR KINECT**

Oleh:

Wahyu Anggoro
NRP. 02311440000093

Surabaya, 25 Juli 2018

**Menyetujui,
Dosen Pembimbing**



Dr. rer. nat. Ir. Aulia M. T. Nasution, M. Sc.
NIP. 19671117 199702 1 001

**Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS**



Agus Muhammad Hatta, S. T., M. Si., Ph. D.
NIP. 19780902 200312 1 002

“Halaman ini memang dikosongkan”

**RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI LUBANG JALAN
BERBASIS *DIGITAL IMAGE CORRELATION* DENGAN
MENGUNAKAN SENSOR KINECT**





TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Wahyu Anggoro
NRP. 0231144000093

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. rer. nat. Ir. Aulia M. T. N., M. Sc. (Pembimbing 1)
2. Agus M Hatta, S. T., M. Si., Ph. D. (Penguji 1)
3. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M. Sc. (Penguji 2)
4. Detak Yan Pratama, S. T., M. Sc. (Penguji 3)

SURABAYA
Juli, 2018

“Halaman ini memang dikosongkan”

RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI LUBANG JALAN BERBASIS *DIGITAL IMAGE CORRELATION* DENGAN MENGGUNAKAN SENSOR KINECT

Nama Mahasiswa : Wahyu Anggoro
NRP : 02311440000093
Program Studi : S1 Teknik Fisika
**Dosen Pembimbing : Dr. rer. nat. Ir. Aulia M.T. Nasution,
M. Sc.**

Abstrak

Telah dibangun sistem deteksi lubang jalan berbasis *digital image correlation* dengan menggunakan sensor kinect yang dapat mendeteksi serta mengkuantifikasi dimensi lubang jalan yaitu kedalaman, luas, volume, dan posisi. Penentuan lubang diawali dengan proses normalisasi citra kedalaman dari objek lubang jalan. *Thresholding* dilakukan pada citra ternormalisasi untuk memisahkan antara objek lubang dengan latar belakangnya. Kuantifikasi imensi lubang dilakukan dengan menggunakan model yang telah didapatkan dalam proses karakterisasi sensor. Proses validasi sistem dengan menguji pada lubang buatan dengan variasi kedalaman 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm, dan 12 cm, setiap variasi kedalaman memiliki ukuran diameter yaitu 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, dan 25 cm. Dari hasil validasi tersebut sistem yang dibuat dapat bekerja dengan nilai error kurang dari 7% pada lubang rentang berdiameter 5-25 cm dengan rentang kedalaman 6-12 cm. Resolusi kedalaman sistem adalah sebesar 0.43 cm, resolusi spasial sistem bergantung pada jarak sensor menuju objek, sistem dengan jarak 120 cm memiliki reolusi spasial disumbu horizontal dan vertikal sebesar 0.21 cm dan 0,22 cm.

**Kata kunci : Lubang jalan, Deteksi dan Kuantifikasi
kerusakan Jalan, *Digital image correlation*,
Microsoft Kinect**

“Halaman ini memang dikosongkan”

DESIGN OF POTHOLE DETECTION SYSTEM BASED ON DIGITAL IMAGE CORRELATION USING KINECT SENSOR

Name : Wahyu Anggoro
NRP : 0231144000093
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisors : Dr.rer.nat.Ir. Aulia M.T. Nasution M. Sc.

Abstract

Pothole detection system based on digital image correlation had been made using kinect sensor that could detect and quantified pothole dimesions such as depth, area, volume and position. Pothole detection was start with normalization process on depth image from the pothole that was used as an quantifying object. Then thresholding was done on the normalized image in order to separate between pothole and its background. Dimension quantification was done by making the work model from the sensor characterization result. Next, validation system process was done by testing the artificial pothole with the depth variation of 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm and 12 cm, every depth variation had each given diameter of 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, and 25 cm. Based on the results of the validation, the system has an error value of less than 7% on the hole diameter range of 5-25cm with a depth range of 6-12 cm. The depth resolution of the system is 0.43 cm while the system spatial resolution depends on the distance between sensor and the quantifying object, for sensor system with distance span of 120 cm would have spatial resolution on horizontal and vertical axis of 0.21 cm and 0.22 cm respectively.

Keywords :Potholes, Detection and Quantification of Road Damage, Digital image correlation, Microsoft Kinect

“Halaman ini memang dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah S.W.T, karena rahmat-Nya berupa kesehatan dan kesempatan sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini. Laporan tugas akhir yang telah dikerjakan berjudul :

“RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI LUBANG JALAN BERBASIS *DIGITAL IMAGE CORRELATION* DENGAN MENGGUNAKAN SENSOR KINECT”

Dalam proses penyelesaian laporan tugas akhir ini, Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Agus Muhamad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
2. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika-ITS atas pengajaran, ilmu, serta wawasan yang sangat berharga.
3. Dr. rer. nat. Ir. Aulia M. T. Nasution M.Sc selaku dosen pembimbing tugas akhir ini.
4. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Fisika yang senantiasa memberikan dukungan dalam bentuk motivasi ataupun dalam bentuk diskusi yang membantu dalam penyelesaian tugas akhir .
5. Rekan-rekan dari Laboratorium Rekayasa Fotonika Teknik Fisika-ITS yang telah banyak memberikan kritik, saran, ilmu, dan wawasannya yang sangat membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir dengan baik.
7. Teman-teman TA-wan yaitu Iman, Achmadi, Achmad, Fadhel, Rinda, Intan, Dan Wilda yang telah memotivasi dan memberikan bantuan dalam penyelesaian laporan tugas akhir.
8. Segenap keluarga penulis yang telah memberikan dukungan penuh terhadap penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya.

Surabaya, 23 Juli 2018

Penulis

Daftar Isi

Halaman Judul	i
Pernyataan Bebas Plagiasi	v
Lembar Pengesahan	vii
Abstrak	ix
Abstract	xi
Kata Pengantar	xiii
Daftar Isi	xv
Daftar Gambar	xvii
Daftar Tabel	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Laporan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Lubang jalan	5
2.2 <i>Digital Image Correlation</i> (DIC)	5
2.3 Sensor Kinect	6
2.4 <i>Thresholding Otsu</i>	9
2.5 <i>Morfological Image Processing</i>	10
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	13
3.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah	14
3.2 Studi Literatur	14
3.3 Perancangan Sistem	14
3.4 Pembuatan perangkat keras	16
3.5 Pembuatan perangkat lunak	19
3.6 Pengambilan data lubang jalan	19
3.7 Validasi	19
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	21
4.1 Karakterisasi Kinect	21
4.2 Validasi	24
4.3 Pengaruh jarak sensor terhadap nilai error	38
4.4 Pengujian lubang aktual	39

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA.....	45
BIODATA PENULIS.....	69

Daftar Gambar

Gambar 2. 1	Deformasi citra dan bentuk subset	6
Gambar 2. 2	Susunan sensor Kinect	6
Gambar 2. 3	Prinsip kerja Kinect SL	7
Gambar 2. 4	Pola bintang hasil proyeksi Kinect	8
Gambar 2. 5	Prinsip kerja ToF	9
Gambar 3. 1	Diagram alir penelitian tugas akhir	13
Gambar 3. 2	Skema sistem pendeteksi lubang jalan	14
Gambar 3. 3	Diagram blok algoritma deteksi lubang	15
Gambar 3. 4	<i>Set-up</i> karakterisasi sensor kinect	17
Gambar 3. 5	Perangkat monitoring	18
Gambar 3. 6	Rangkaian modul GPS, arduino, dan battery	19
Gambar 3. 7	Lubang buatan	20
Gambar 4. 1	Karakteristik kedalaman	21
Gambar 4. 2	Karakteristik kedalaman pada rentang daerah kerja sistem	22
Gambar 4. 3	Karakteristik spasial	23
Gambar 4. 4	Lubang berkedalaman 2 cm	25
Gambar 4. 5	Lubang berkedalaman 4 cm	27
Gambar 4. 6	Lubang berkedalaman 6 cm	29
Gambar 4. 7	Lubang berkedalaman 8 cm	31
Gambar 4. 8	Lubang berkedalaman 10 cm	33
Gambar 4. 9	Lubang berkedalaman 12 cm	35
Gambar 4. 10	Pengaruh jarak terhadap nilai error	38
Gambar 4. 11	Proses algoritma sistem	40

“Halaman ini memang dikosongkan”

Daftar Tabel

Tabel 2. 1	Klasifikasi kondisi lubang jalan.....	5
Tabel 4.1	Luas aktual lubang berkedalaman 2 cm dan pembacaan alat	26
Tabel 4.2	Volume aktual lubang berkedalaman 2 cm dan pembacaan alat	26
Tabel 4.3	Luas aktual lubang berkedalaman 4 cm dan pembacaan alat	28
Tabel 4.4	Volume aktual lubang berkedalaman 4 cm dan pembacaan alat	28
Tabel 4.5	Luas aktual lubang berkedalaman 6 cm dan pembacaan alat	30
Tabel 4.6	Volume aktual lubang berkedalaman 6 cm dan pembacaan alat	30
Tabel 4.7	Luas aktual lubang berkedalaman 8 cm dan pembacaan alat	32
Tabel 4.8	Volume aktual lubang berkedalaman 8 cm dan pembacaan alat	32
Tabel 4. 9	Luas aktual lubang berkedalaman 10 cm dan pembacaan alat	34
Tabel 4.10	Volume aktual lubang berkedalaman 10 cm dan pembacaan alat	34
Tabel 4. 11	Luas aktual lubang berkedalaman 12 cm dan pembacaan alat	36
Tabel 4. 12	Volume aktual lubang berkedalaman 12 cm dan pembacaan alat	36
Tabel 4. 13	Nilai error dari hasil luas estimasi	37
Tabel 4. 14	Nilai error dari hasil volume estimasi.....	37
Tabel 4. 15	Hasil pengujian lubang aktual	41
Tabel 4. 16	Posisi lubang jalan aktual	41

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lubang pada jalan merupakan masalah yang kerap kali menyebabkan terjadinya kecelakaan serta ketidaknyamanan dalam berkendara. Lubang jalan juga merupakan penyebab utama terjadinya kerusakan pada kendaraan khususnya as dan suspensi kendaraan. Di Indonesia sendiri, kondisi jalan nasional yang berada pada keadaan baik yaitu sepanjang 27.476,68 Km atau sekitar 57 % dari total jalan nasional yang ada, sedangkan 14.563,6 Km berkondisi sedang dan sisanya berada pada kondisi rusak (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2016). Kerusakan-kerusakan tersebut dapat dipengaruhi beberapa faktor diantaranya faktor cuaca, beban kendaraan yang melewati jalan, material dari jalan tersebut, dan kondisi tanah dasar yang tidak stabil. Adanya kerusakan kerusakan tersebut akan mengganggu aktifitas transportasi dan distribusi barang atau jasa, sehingga akan berimbas pada pertumbuhan ekonomi dari suatu daerah.

Pada dasarnya setiap jalan akan mengalami proses pengrusakan secara progresif sejak jalan pertama kali dibuka untuk lalu lintas. Untuk memudahkan manajemen perbaikan jalan, maka diperlukan suatu metode untuk menentukan kondisi jalan agar dapat disusun program pemeliharaan jalan yang akan dilakukan. Selain itu penentuan dimensi (luas dan volume) dari suatu lubang pun sangat dibutuhkan, sebagai data acuan bagi pemerintah terkait dalam hal perbaikan jalan. Dengan mengetahui ukuran serta posisi dari setiap lubang yang ada di jalan, pemerintah dapat memperkirakan bahan baku jalan yang diperlukan untuk memperbaiki kerusakan jalan di daerah tertentu, sehingga akan meminimalisir biaya dalam mentransportasikan bahan baku yang diperlukan.

Deteksi serta penentuan posisi kondisi lubang jalan sangatlah berguna untuk perencanaan prioritas penjadwalan yang diperlukan dalam menutup atau memperbaiki lubang jalan di daerah tertentu, sehingga dapat mengurangi biaya material dan transportasi yang

digunakan. Dalam penentuan lubang jalan dapat dilakukan secara survei manual ataupun menggunakan alat bantu yang lebih canggih. Pengamatan secara manual tentunya membutuhkan waktu yang lama serta memiliki resiko kecelakaan bagi pengamat yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan alat atau teknologi pembantu (Bianchini *et al.*, 2010). Salah satu metode yang dapat digunakan dalam deteksi serta kuantifikasi kerusakan jalan yaitu menggunakan metode pemrosesan citra (*image processing*) dan *machine-vision*. Kedua metode tersebut memiliki keunggulan yaitu dapat bekerja secara otomatis dan menghilangkan faktor subjektivitas serta lebih akurat dalam mengkuantifikasi dimensi lubang jalan dibandingkan dengan survei secara manual (Kamal *et al.*, 2016).

Beberapa metode untuk mendeteksi lubang jalan lainnya telah banyak diteleti. Seperti yang telah kaji oleh Erikson, proses pendeteksian lubang jalan dilakukan dengan menggunakan sensor *accelerometer* yang dilengkapi GPS (*Global Positioning System*), Namun kekurangan dari metode tersebut yaitu teknik ini mengharuskan setidaknya satu roda yang melewati lubang agar terdeteksi (Eriksson *et al.*, 2008). Beberapa teknik yang menggunakan metode pemrosesan citra (*image processing*) dan *machine-vision* diantaranya yaitu penggunaan kamera stereo atau teknik yang mengkombinasikan kamera dengan devais optik lainnya seperti laser ataupun LED. Teknik lainnya yaitu penggunaan sekumpulan data video, namun teknik ini tidak memberikan hasil yang memuaskan, hal tersebut karena data berupa video tidak menyedian data kedalaman citra (Koch, 2011)(Ryu *et al.*, 2015)(Wang *et al.*, 2017). Metode lainnya yang dapat digunakan adalah menggunakan prinsip triangulation dengan menggunakan laser garis dan kamera, teknik ini dapat mendeteksi lubang jalan serta keretakan (Vupparaboina *et al.*, 2015). Kamera stereo atau teknik yang menggunakan dua kamera yang dipasang paralel untuk mendapatkan kedalaman citra juga diketahui dapat digunakan dalam mendeteksi lubang jalan(Zhang, Xiao Ai and Chan, 2014).

Pada tahun 2010, *Microsoft* yang bekerjasama dengan *Primesense* mengeluarkan sebuah produk berupa kamera pengukur jarak dengan menggunakan elemen struktur yang dinamakan Kinect. Kinect untuk memperoleh kedalaman dari sebuah permukaan menggunakan teknik *Digital Image Correlation* (DIC). Dimana alat tersebut memberikan fitur citra kedalaman dengan resolusi VGA dan memiliki *frame rate* 30Hz, dipadu dengan kamera warna RGB pada resolusi yang sama (Sarbolandi *et al.*, 2015). Walaupun pada awalnya teknologi ini didesain untuk kebutuhan permainan (*game*), namun beberapa peneliti mengembangkannya untuk menghasilkan inovasi-inovasi aplikasi, diantaranya di bidang medis (Filko *et al.*, 2016)(Yuminaka *et al.*, 2016)(Kumagai *et al.*, 2016), Augmented Reality (Vera *et al.*, 2011), dan Pengukuran getaran (Franco *et al.*, 2017)(Shen *et al.*, 2015). Hal tersebut tidak menutup kemungkinan penggunaan Kinect dalam aplikasi deteksi lubang jalan. Oleh karena itu pada penelitian tugas akhir ini diajukan sebuah rancang bangun sistem deteksi lubang jalan dengan menggunakan sensor Kinect.

1.2 Rumusan Masalah

Dari paparan latar belakang diatas, maka permasalahan dari pelaksanaan tugas akhir ini adalah bagaimana merancang sebuah sistem pendeteksi posisi dan kuantifikasi atas kondisi lubang jalan berbasis *digital image correlation* dengan menggunakan sensor Kinect?

1.3 Tujuan

Berdasarkan pemaparan latar belakang dan rumusan masalah diatas, tujuan dari tugas akhir ini adalah Membangun sebuah sistem pendeteksi posisi dan kondisi lubang jalan berbasis *digital image correlation* dengan menggunakan sensor Kinect yang dapat mendeteksi dan mengkuantifikasi lubang jalan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan permasalahan agar pembahasan tidak meluas dan menyimpang dari tujuan. Adapun batasan permasalahan dari tugas akhir yang dirancang ini adalah :

1. Kinect yang digunakan merupakan Kinect dengan tipe Kinect Microsoft V1.
2. Kerusakan jalan yang dideteksi hanya berupa lubang jalan.
3. Lubang jalan yang diukur memiliki ukuran kurang dari 120 cm x 95 cm.
4. Lubang jalan yang dipilih terdapat di permukaan jalan yang rata.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

- a. **BAB I PENDAHULUAN**
Pada bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika laporan.
- b. **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**
Pada bab II dibahas landasan teori yang digunakan dalam penelitian ini, adapun landasan teori yang dimaksud adalah lubang jalan, *digital image correlation* (DIC), sensor Kinect, *Thresholding*, *Morfological image processing*.
- c. **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**
Pada bab III dijelaskan alur pengerjaan penelitian tugas akhir serta metode-metode yang digunakan.
- d. **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**
Pada bab IV analisa dari proses pengambilan data yang diantaranya, yaitu proses karakterisasi, validasi, serta pengujian di lapangan.
- e. **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**
Pada bab V berisi kesimpulan yang berasal dari proses analisa data serta saran untuk penelitian selanjutnya dengan topik yang sama.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lubang jalan

Lubang jalan merupakan kerusakan spasial pada permukaan jalan aspal yang terjadi dikarenakan adanya patahan pada permukaan aspal atau bagian dasar aspal. Hal ini dapat disebabkan oleh faktor cuaca dan jumlah lalu lintas kendaraan yang melewatinya. Menurut *Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation*, cekungan pada jalan dikatakan sebagai lubang jalan adalah cekungan dengan panjang bidang maksimal sebesar 15 cm. Dalam klasifikasi berdasarkan tingkat kerusakannya, lubang jalan dapat diklasifikasikan menjadi 3 kriteria, yaitu:

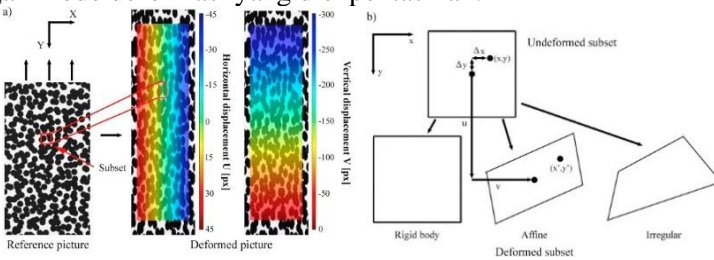
Tabel 2.1 Klasifikasi kondisi lubang jalan

Tingkat kerusakan	Kedalaman lubang
Rendah	< 5 cm
Sedang	5 – 10 cm
Tinggi	>10 cm

2.2 Digital Image Correlation (DIC)

Istilah *Digital Image Correlation* (DIC) mengacu pada metode pengukuran non-kontak untuk memperoleh citra permukaan dari sebuah objek, menyimpannya dalam bentuk data digital, serta melakukan korelasi dengan citra referensi untuk mendapatkan bentuk permukaan dan data deformasi (Van Mieghem, Ivens and Van Bael, 2017). Teknik ini menggunakan pola bintang acak, tidak berulang, kontras tinggi, dan *isotropic* untuk membedakan antara tiap piksel. Dalam penentuan deformasi permukaan digunakan subset yang berisi pola bintang tertentu, ukuran dari subset sendiri umumnya tidak begitu besar hanya beberapa piksel dengan bentuk persegi. Setiap *subset* akan membandingkan pola bintang referensi dengan pola bintang hasil deformasi. *Subset* akan berpindah dengan jarak (piksel) tertentu untuk membandingkan seluruh bagian dari citra bintang referensi

dengan citra bitnik hasil deformasi yang diperoleh. *Subset* yang digunakan dapat berubah posisi, bentuk, dan ukuran selama proses korelasi. Fungsi dari bentuk subset yang dipilih berhubungan dengan mode deformasi yang diekpektasikan.



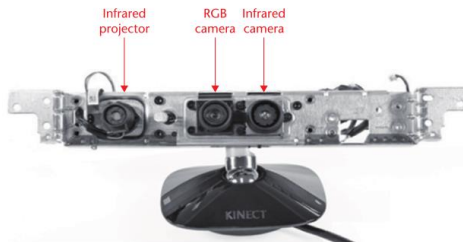
(a). Perubahan citra karena deformasi

(b). Beberapa bentuk subset

Gambar 2. 1 Deformasi citra dan bentuk subset
(Van Mieghem *et al.*, 2017)

2.3 Sensor Kinect

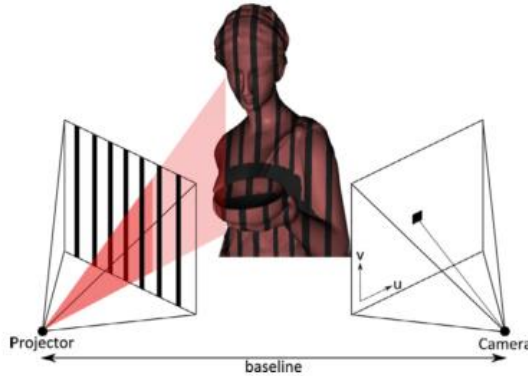
Sensor Kinect pada awalnya dirilis oleh Microsoft pada tahun 2010. Sensor Kinect merupakan sensor yang terdiri dari beberapa komponen yaitu sensor kedalaman yang terdiri atas proyektor inframerah dan kamera inframerah serta kamera warna RGB. Sensor Kinect menyediakan kemampuan dalam pergerakan tiga dimensi dari sebuah objek, *facial recognition*, dan lain -lain. Karena fitur dan harga yang relative murah yang dimilikinya telah banyak penelitian yang mengembangkan Kinect untuk kebutuhan berbagai aplikasi.



Gambar 2. 2 Susunan sensor Kinect

Dalam perkembangannya Kinect dapat dikategorikan menjadi 2 berdasarkan cara kerjanya yaitu Kinect berbasis *Structured Light* (SL) dan Kinect berbasis *Time Of Flight* (ToF) (Sarbolandi *et al*, 2015).

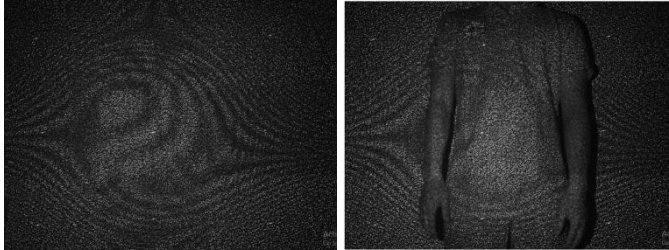
1) Structured Light (SL)



Gambar 2. 3 Prinsip kerja Kinect SL
(Sarbolandi *et al*, 2015)

SL merupakan salah satu jenis teknik penglihatan stereo aktif. Pada Kinect jenis ini teknik yang digunakan adalah *Digital Image Correlation* (DIC). DIC menggunakan citra dari sebuah objek kemudian dikorelasikan dengan citra referensi untuk menentukan kedalaman dari sebuah permukaan objek (McCormick *et al.*, 2010). Kinect menggunakan sumber cahaya berupa susunan pola cahaya diproyeksikan menuju objek. Kemudian objek diamati dengan kamera dari arah atau sudut pandang yang berbeda (gambar 2.3). Deformasi objek akan mempengaruhi pola cahaya yang teramati pada kamera. Dengan menganalisa distorsi yang terjadi pada pola yang di proyeksikan, informasi kedalaman dapat didapatkan (gambar 2.4). Dalam penentuan kedalaman pada sebuah objek, Kinect menggunakan posisi relatif setiap titik/bintik pada pola yang dipancarkan untuk menghitung

perubahan kedalaman pada setiap posisi piksel dalam citra (Andersen *et al.*, 2012).



(a). Pola bintang yang dipancarkan kinect

(b). Objek yang terpapar pola bintang

Gambar 2. 4 Pola bintang hasil proyeksi Kinect

Teknik *trangulation* digunakan untuk menghitung informasi kedalaman antara pola yang terproyeksi dengan kamera NIR (*Near Infrared*) dan pola masukan yang tersimpan. Untuk setiap piksel, kedalaman diestimasi dengan mencari koreksi terbaik dari sebagian pola, biasanya menggunakan jendela 9x9 piksel pada citra NIR yang berhubungan dengan pola yang di proyeksikan.

2) *Time of Flight* (ToF)

Metode ToF merupakan metode yang berdasarkan pada waktu yang dibutuhkan cahaya dari emitter menuju objek dan kembali lagi menuju sensor. Kinect dengan prinsip ToF menggunakan gelombang kontinu dengan intensitas yang dimodulasi. persamaan berikut merupakan persamaan korelasi antara sinyal referensi dengan sinyal yang tertangkap sensor (Sarbolandi *et al.*, 2015) :

$$C[g^{ill}, g^{ref}] = s \otimes g = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s^{ill}(t) g^{ref}(t) dt \quad (2.1)$$

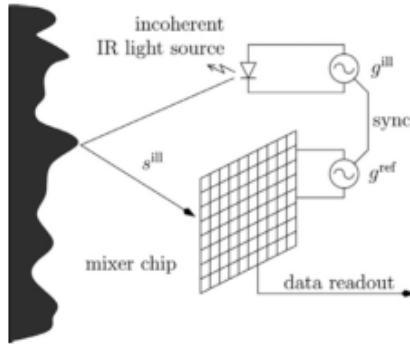
Perubahan fase dapat dihitung dengan menggunakan berbagai pengukuran korelasi. Pengukuran dilakukan dengan memvariasikan illuminansi dan sinyal referensi

g^{ill} , dan g^{ref} . Sebagai contoh menggunakan beberapa jenis modulasi :

$$\phi = \mathcal{G}(A_0, A_1, A_2, \dots, A_n) \quad (2.2)$$

$$A_i = C[g_i^{ill}, g_i^{ref}], i = 1, \dots, n \quad (2.3)$$

A_i disebut dengan fasa citra atau citra korelasi.



Gambar 2. 5 Prinsip kerja ToF
(Sarbolandi *et al*, 2015)

2.4 Thresholding Otsu

Segmentasi citra merupakan sebuah proses atau teknik untuk membagi citra menjadi beberapa bagian. Proses segmentasi merupakan langkah dasar untuk menganalisa sebuah citra, representasi sebuah objek, visualisasi, dan aplikasi pemrosesan citra lainnya. Tujuan utama proses segmentasi adalah untuk menyederhanakan atau merubah perspektif suatu citra menjadi citra yang mudah untuk dianalisa. *Thresholding* adalah salah satu teknik yang banyak digunakan untuk keperluan segmentasi citra. Cara kerja dasar dari teknik *Thresholding* adalah memilih nilai batas ambang yang tepat dari skala keabuan citra. Tujuan dari *Thresholding* adalah untuk memisahkan objek pada citra dengan latar belakang pada citra (Goh *et al.*, 2018). Jika $g(x,y)$ merupakan representasi *Thresholding* dari sebuah citra $f(x,y)$, $g(x,y)$ dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{jika } f(x,y) \geq T \\ 0, & \text{jika } f(x,y) < T \end{cases} \quad (2.4)$$

Operator *Thresholding* didefinisikan sebagai berikut:

$$T = M[x, y, p(x, y), f(x, y)] \quad (2.5)$$

Pada persamaan tersebut, T merupakan nilai ambang batas, $f(x,y)$ adalah nilai skala keabuan dari sebuah citra, dan $p(x,y)$ adalah hubungan titik (x,y) dengan piksel sekelilingnya, misalnya $p(x,y)$ adalah nilai rata-rata keabuan titik (x,y) dengan sekelilingnya (Vala and Baxi, 2013).

Teknik *Thresholding* dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu :

1) *Thresholding* global, dimana nilai T hanya bergantung pada nilai skala keabuan pada citra atau $f(x,y)$ sehingga setiap piksel pada citra memiliki ambang batas yang sama.

2) *Thresholding* lokal, nilai ambang tiap piksel atau sebagian pada citra memiliki nilai yang berbeda yang bergantung pada $p(x,y)$.

Metode *Thresholding* Otsu merupakan salah satu jenis *Thresholding* global yang digunakan untuk menentukan batas ambang optimal dari sebuah citra (Vala and Baxi, 2013)(Patil and A, 2016).

2.5 Morphological Image Processing

Operasi morfologi merupakan operasi yang umum dikenakan pada citra biner (hitam-putih) untuk mengubah struktur bentuk objek yang terkandung dalam citra. Inti operasi morfologi melibatkan dua larik piksel. Larik pertama berupa citra yang akan dikenai operasi morfologi, sedangkan larik kedua dinamakan sebagai kernel atau *structuring element* (elemen penstruktur).

Dua operasi yang mendasari morfologi yaitu dilasi dan erosi. Operasi dilasi biasa dipakai untuk mendapatkan efek pelebaran terhadap piksel yang bernilai satu atau “hit” dengan elemen penstrukturnya. Operasi ini dirumuskan seperti berikut:

$$A \oplus B = \{Z \mid [(\hat{B})_Z \cap A] \subset A\} \quad (2.6)$$

Operasi erosi biasa digunakan untuk mendapatkan efek pengecilan terhadap piksel yang “fit” dengan elemen penstrukturnya. Operasi ini dirumuskan seperti berikut:

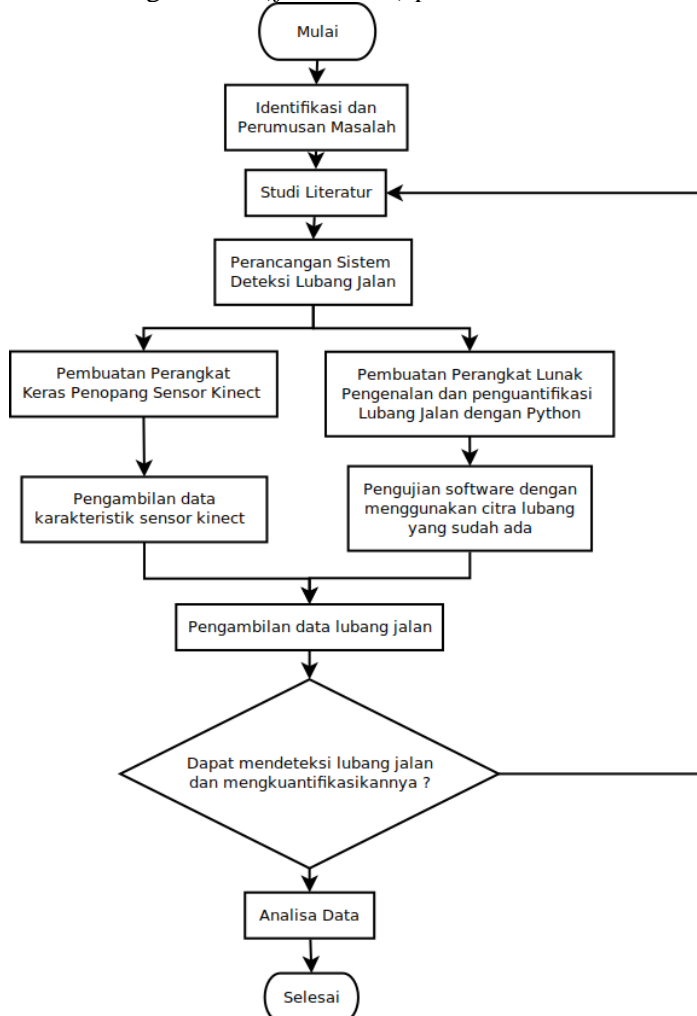
$$A \ominus B = \{Z | (B)z \subseteq A\} \quad (2.7)$$

A merupakan citra biner, sedangkan B adalah elemen struktur yang dapat berupa berbagai bentuk seperti persegi, lingkaran, persegi panjang, dll. Operasi dilasi serta erosi dapat diturunkan menjadi sebuah operator atau fungsi yang lebih aplikatif seperti menghilangkan derau (operasi *opening* atau *closing*), deteksi tepi, *Convex Hull*, *Region Filling*, dan *Skeleton* (Gonzalez and Woods, 2002)

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini ditampilkan dengan sebuah diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian tugas akhir

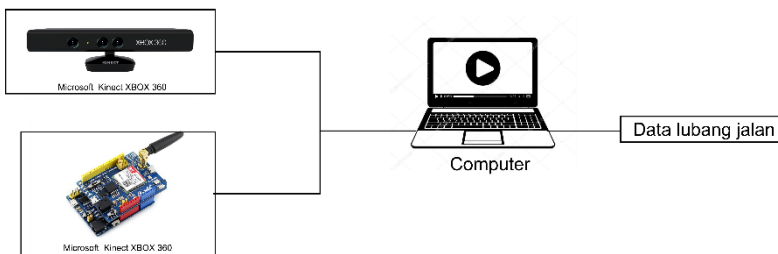
3.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Pada tahap ini dilakukan mengidentifikasi masalah-malah yang berpengaruh dalam penentuan kerusakan jalan (lubang jalan) dari beberapa metode-metode yang pernah digunakan. Dari masalah-masalah yang telah terkumpul, kemudian dirumuskan untuk menjadi masalah yang akan diselesaikan dalam tugas akhir ini.

3.2 Studi Literatur

Tahap ini merupakan tahap pengumpulan berbagai hasil-hasil penelitian atau berbagai sumber lainnya yang berkaitan dengan metode atau teknik dalam penentuan atau deteksi kerusakan jalan, khususnya dengan menggunakan sensor Kinect. Pada tahap ini lebih difokuskan untuk mencari landasan teori dalam pemanfaatan Kinect dalam aplikasi deteksi kerusakan jalan (lubang jalan) seperti teknik kalibrasi kamera Kinect, algoritma-algoritma yang dibutuhkan, dan beberapa parameter lainnya.

3.3 Perancangan Sistem



Gambar 3. 2 Skema sistem pendeteksi lubang jalan

Perancangan sistem pada tugas akhir ini dilakukan dengan merancang perangkat lunak serta perangkat keras yang akan digunakan.

Perangkat keras yang digunakan dalam sistem pendeteksi lubang adalah sensor kinect XBOX 360, modul GSM/GPRS/GPS Shield (B) dan Arduino Uno, Battery 12 V dan 9 V. Sensor kinect membutuhkan sumber daya sebesar 12 V. Modul GPS

membutuhkan daya minimal 5 V, namun yang digunakan pada sistem ini adalah 9 V.

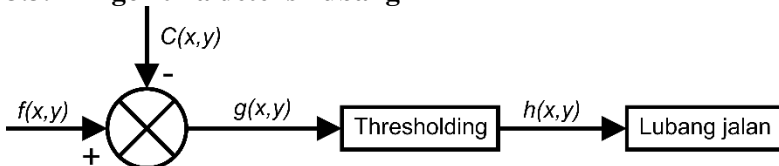
Perangkat lunak yang akan dibuat terdiri atas beberapa algoritma, yaitu:

1. Algoritma pembacaan lokasi lubang
2. Algoritma deteksi lubang
3. Algoritma perhitungan karakteristik lubang

3.3.1 Algoritma pembacaan lokasi lubang

Pembacaan lokasi lubang pada penelitian ini menggunakan modul GPS yang terhubung dengan Arduino Uno untuk membantu komunikasi data lokasi hasil pembacaan modul GPS dengan komputer. Lokasi yang dihasilkan oleh modul GPS berupa lokasi dalam bentuk *latitude* dan *longitude*.

3.3.2 Algoritma deteksi lubang



Gambar 3. 3 Diagram blok algoritma deteksi lubang

Algoritma deteksi lubang yang digunakan diawali dengan mengambil citra kedalaman dari permukaan jalan tanpa lubang $C(x,y)$ sebagai citra referensi. Citra kedalaman lubang jalan $f(x,y)$ dikurangi dengan $C(x,y)$ untuk menghasilkan citra yang telah ternormalisasi $g(x,y)$, hal ini perlu dilakukan karena saat pengambilan citra dari permukaan jalan yang datar, citra yang dihasilkan terjadi kemiringan. Citra yang telah ternormalisasi akan dilakukan proses *thresholding* untuk memisahkan antara antara lubang jalan dan permukaan jalan. Citra hasil proses *thresholding* $h(x,y)$ merupakan citra lubang yang telah terpisah dengan permukaan jalan.

3.3.3 Algoritma perhitungan karakteristik lubang

Karakteristik lubang yang dimaksud adalah luas permukaan dan volume dari lubang yang telah terdeteksi. Luas permukaan lubang dapat diestimasi dengan mengetahui jumlah piksel yang terbaca sebagai lubang serta jarak lubang dari sensor kinect, untuk mendapatkan fungsi konversinya dilakukan karakterisasi jarak dan karakterisasi spasial dari sensor kinect. Berikut merupakan fungsi yang digunakan dalam mengestimasi luas permukaan lubang.

$$A = A' \cdot n \quad (3.1)$$

Sedangkan untuk mengestimasi volume dari lubang digunakan persamaan berikut ini.

$$V = \sum_{i=1}^n A_i d_i \quad (3.2)$$

Karena luas tiap piksel memiliki nilai sama, maka:

$$A_1, A_2, A_3, \dots, A_n = A' \quad (3.3)$$

Sehingga,

$$V = A' \sum_{i=1}^n d_i \quad (3.4)$$

Keterangan:

V = Volume lubang estimasi (cm³)

A = Luas lubang estimasi (cm²)

A' = Luas 1 piksel

d = Jarak titik pada objek dari kamera (cm)

n = jumlah piksel lubang

3.4 Pembuatan perangkat keras

Pembuatan perangkat keras meliputi pembuatan sistem untuk kebutuhan karakterisasi, validasi, dan perangkat keras sistem yang dilakukan untuk pengambilan data lubang di jalan.

(a). *Set-up* tampak samping

(b). Ukuran plat

Gambar 3. 4 *Set-up* karakterisasi sensor kinect

Set-up karakterisasi terdiri plat datar dengan ukuran 40 cm x 45 cm. Plat datar diletakkan tegak lurus terhadap sensor kinect dan dirubah jaraknya dari 60 cm hingga 180 cm dengan kenaikan 10 cm untuk mendapatkan karakteristik jarak pada kinect seperti pada gambar 3.4.

Karakterisasi spasial bertujuan untuk mengetahui hubungan antara ukuran objek (panjang dan lebar) dengan jumlah piksel yang yang terbaca pada sensor kinect. Pada karakterisasi ini dilakukan dengan menggunakan plat datar berukuran 20 cm x 20 cm yang diletakkan tegak lurus dengan sensor kinect. Karena panjang/lebar yang terbaca oleh kinect dari sebuah objek merupakan fungsi terhadap jarak, maka dalam proses karakterisasi spasial dilakukan dengan mengubah jarak plat mulai dari 110 hingga 150 (rentang pengukuran) dengan kenaikan variasi 5 cm. Pada proses ini bertujuan untuk mendapatkan luas 1 piksel yang merepresentasikan luas sesungguhnya.

$$A' = \frac{A}{l_x(d) \times l_y(d)} \quad (3.5)$$

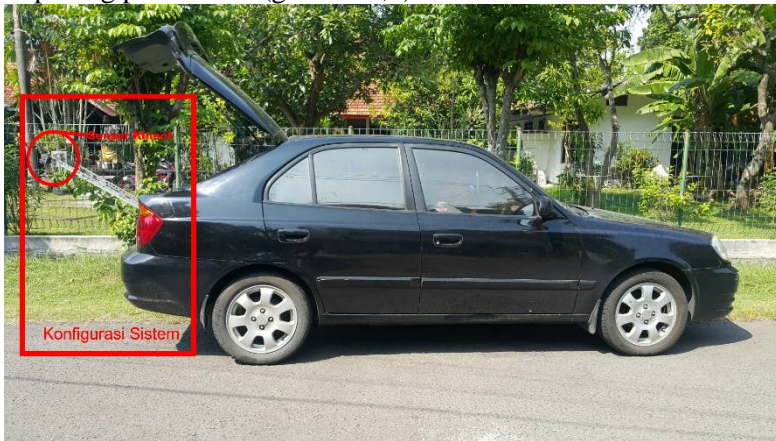
Keterangan :

$A'(d)$ = Luas 1 piksel, fungsi terhadap jarak

$l_x(d)$ = Jumlah piksel yang terbaca dari objek dengan lebar 20 cm dengan jarak d dari Kinect, fungsi terhadap jarak

$ly(d)$ = Jumlah piksel yang terbaca dari objek dengan panjang 20 cm dengan jarak d dari Kinect, fungsi terhadap jarak
 d = Jarak objek dari Kinect

Perangkat sistem pengukuran terdiri atas sensor kinect yang dipasang pada penopang, diletakkan pada mobil dengan jarak 120 cm dari permukaan tanah atau jalan. Berikut gambar sistem yang terpasang pada mobil (gambar 3,5).



(a). Perangkat monitoring
(tampak samping)



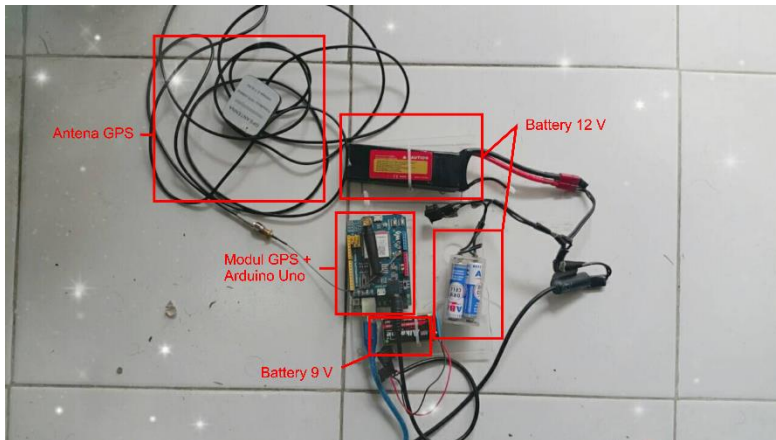
(b). Perangkat monitoring
(tampak belakang)



(c). Perangkat monitoring
(tampak samping belakang)

Gambar 3. 5 Perangkat monitoring

Penentuan lokasi lubang ditentukan dengan menggunakan modul GPS. Seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 3. 6 Rangkaian modul GPS, arduino, dan battery

3.5 Pembuatan perangkat lunak

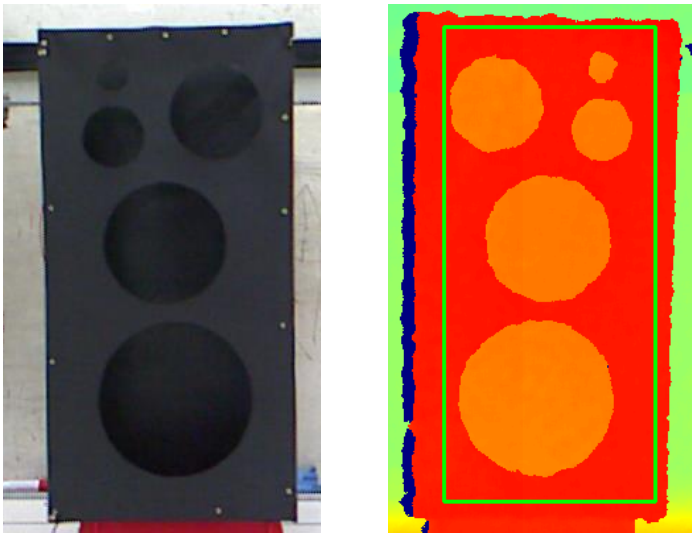
Perangkat lunak yang digunakan adalah python 3.0. Laptop yang digunakan memiliki spesifikasi *processor* Intel(R) Core(TM) i5-3317U CPU @ 1.7GHz, dan RAM 4 GB.

3.6 Pengambilan data lubang jalan

Pengambilan data dilakukan dengan perangkat keras dan lunak yang telah dibuat. Lubang yang pilih merupakan lubang dengan ukuran kurang dari 126 cm x 95 cm yang merupakan maksimum daerah pengamatan dari sistem.

3.7 Validasi

Validasi yang dilakukan dalam penelitian ini dengan menggunakan lubang buatan yang telah diketahui dimensinya (panjang, lebar, kedalaman). Terdapat 30 lubang dengan ukuran yang berbeda-beda. Lubang buatan yang digunakan berbentuk lingkaran dengan variasi diameter 25 cm, 20 cm, 15 cm, 10 cm, dan 5 cm. Variasi kedalaman yang digunakan adalah 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm, dan 12 cm untuk setiap variasi lubang.



Gambar 3. 7 Lubang buatan

BAB IV

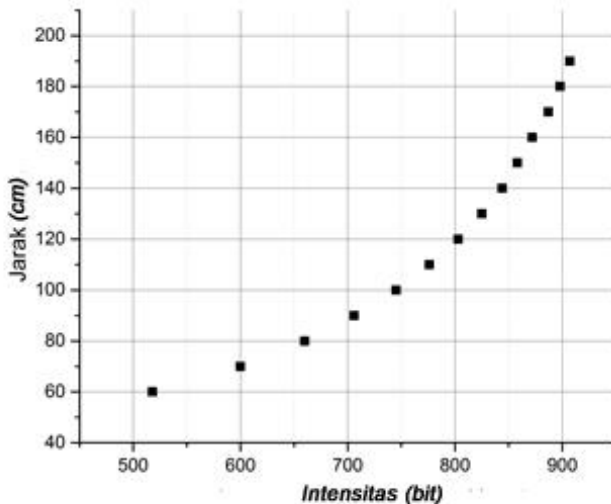
ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Kinect

Karakterisasi sensor kinect dilakukan untuk mengetahui karakteristik sensor kinect serta mencari fungsi konversi jarak dan luas dari objek dari nilai yang terbaca oleh sensor kinect menjadi dimensi yang sesuai dengan kondisi aslinya. Terdapat dua jenis karakterisasi yang dilakukan yaitu karakterisasi jarak dan karakterisasi dimensi spasial lubang.

4.1.1 Karakterisasi jarak

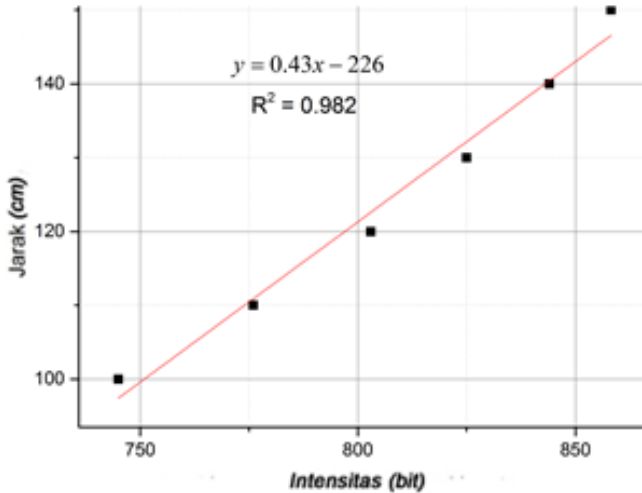
Karakterisasi jarak bertujuan untuk mengetahui hubungan antara nilai yang terbaca oleh sensor kinect dengan jarak sesungguhnya dari sebuah objek.



Gambar 4. 1 Karakteristik kedalaman

Dari grafik tersebut diketahui bahwa hubungan antara jarak dengan nilai yang terbaca tidaklah linier. Fungsi konversi jarak diambil

dari grafik diatas dengan mengambil data pada rentang 100 cm-150 cm yang merupakan rentang kerja dari sistem yang telah dibuat. Nilai yang terbaca Kinect merupakan hasil korelasi dari citra objek dengan citra refrensi yang telah dilakukan normalisasi dalam bentuk data 11 bit. Berikut merupakan karakteristik jarak pada rentang kerja sistem yang telah dibuat.



Gambar 4. 2 Karakteristik jarak pada rentang daerah kerja sistem

Dari grafik tersebut dilakukan regresi untuk mendapatkan persamaan yang merepresentasikan hubungan antara kedalam objek dengan nilai yang terbaca pada sensor kinect. Fungsi regresi yang dipilih adalah fungsi liner karena untuk mempercepat proses komputasi dalam mengkonversi jarak dari tiap piksel yang tertangkap oleh sensor kinect. Berikut persamaan regresi dari grafik diatas:

$$d = 0.43 x - 226 \quad (4. 1)$$

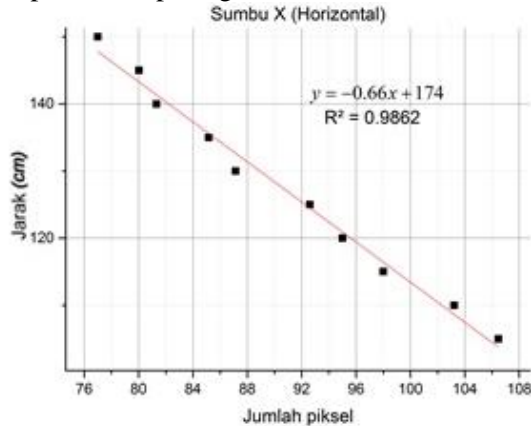
Keterangan :

d = Jarak titik pada objek dari kamera (Cm)

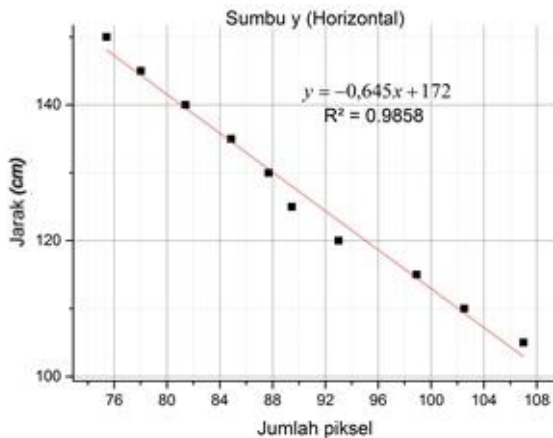
x = Nilai relative yang terbaca pada piksel tertentu

4.1.2 Karakterisasi spasial

Area atau dimensi objek yang terbaca pada kinect dipengaruhi oleh luasan jumlah piksel yang terbaca oleh kinect dan juga jarak antara objek dengan sensor kinect. Panjang 1 piksel (l_x) dan lebar 1 piksel (l_y) merupakan fungsi terhadap jarak, hubungan keduanya dapat dilihat pada grafik dibawah ini.



(a). Karakteristik spasial sumbu horizontal



(b). Karakteristik spasial sumbu vertikal

Gambar 4. 3 Karakteristik spasial

Luas permukaan plat (A) yang digunakan adalah 20 cm x 20 cm = 400 cm², sehingga dari persamaan kedua fungsi regresi tersebut dapat ditentukan luas tiap piksel (A') yang merupakan fungsi terhadap jarak objek ke benda (d).

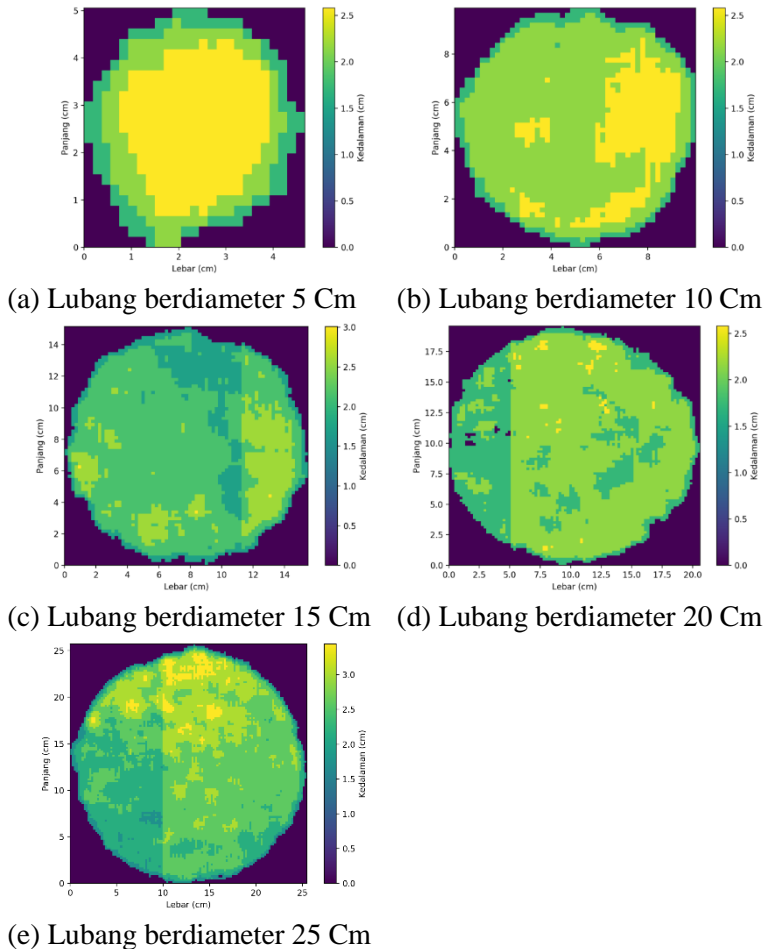
$$A' = \frac{A}{l_x l_y} \quad (4.2)$$

$$A' = \frac{400 \text{ cm}^2}{(-0.6455 \cdot d + 172.74) \cdot (-0.6627 \cdot d + 174)} \quad (4.3)$$

4.2 Validasi

Dalam memvalidasi model persamaan yang telah didapatkan, dilakukan dengan menggunakan lubang buatan yang terdiri dari 5 lubang dengan diameter tetap yaitu 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, dan 25 cm. Kedalaman lubang buatan tersebut dirubah untuk mendapatkan variasi kedalaman, variasi yang digunakan adalah 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm. Setiap variasi dilakukan pengambilan sebanyak 5 kali pengambilan data, berikut merupakan hasil pengambilan data validasi system yang telah dilakukan:

4.2.1 Lubang kedalaman 2 cm



Gambar 4. 4 Lubang berkedalaman 2 cm

Dari kelima lubang tersebut, luas estimasi dari lubang berdiameter 5 cm memiliki nilai error yang lebih besar yaitu diatas 5 %, sedangkan lubang lainnya memiliki error dibawah 5 %. Jika

dilihat dari gambar 4.4, lubang berdiameter 5 cm tidak menunjukkan bentuk lingkaran yang sempurna.

Tabel 4.1 Luas aktual lubang berkedalaman 2 cm dan pembacaan alat

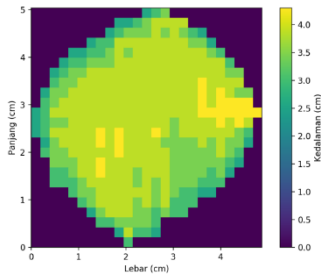
Dimensi aktual			Pembacaan alat		
Diameter (cm)	kedalaman (cm)	luas (cm ²)	Luas rata-rata (cm ²)	Error (%)	Standar deviasi
5.00	2.00	19.63	18.38	6.41	0.52
10.00	2.00	78.54	77.26	1.68	1.36
15.00	2.00	176.7	178.90	1.23	0.68
20.00	2.00	314.16	304.24	3.16	0.68
25.00	2.00	490.87	490.41	0.14	0.12

Nilai volume hasil estimasi memiliki nilai error terbesar pada lubang yang berdiameter 25 cm, sedangkan besarnya error untuk lubang lainnya volume estimasi berkisar dibawah 10 %. Hal ini dapat disebabkan persebaran kedalaman yang tidak homogen, terdapat beberapa daerah yang terestimasi memiliki lebih besar dari 2 cm. Adanya ketidakhomogenan tersebut disebabkan karena posisi lubang yang tidak benar-benar tegak lurus terhadap sensor kinect sehingga terdapat daerah yang terbaca berkedalaman 2 cm sedangkan yang lainnya terbaca kurang atau lebih dari 2 cm seperti pada gambar 4.4.

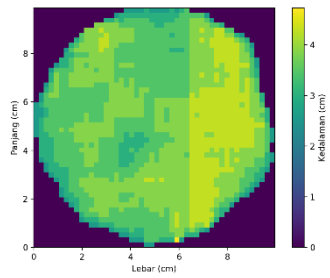
Tabel 4.2 Volume aktual lubang berkedalaman 2 cm dan pembacaan alat

Dimensi aktual			Pembacaan alat		
Diameter (cm)	kedalaman (cm)	Volume (cm ³)	Volume rata-rata (cm ³)	Error (%)	Standar deviasi
5.00	2.00	39.27	42.11	7.23	0.72
10.00	2.00	157.08	167.74	6.79	2.97
15.00	2.00	353.43	385.56	9.09	1.33
20.00	2.00	628.32	613.45	2.37	1.59
25.00	2.00	981.75	1240.90	26.40	1.14

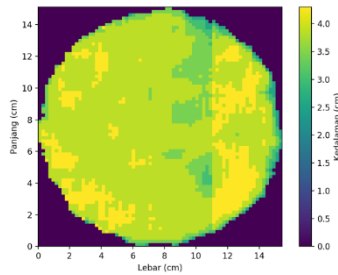
4.2.2 Lubang kedalaman 4 cm



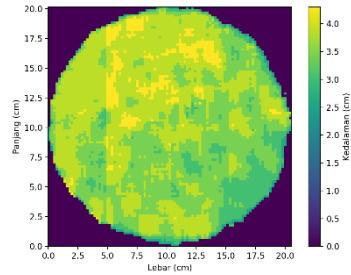
(a) Lubang berdiameter 5 Cm



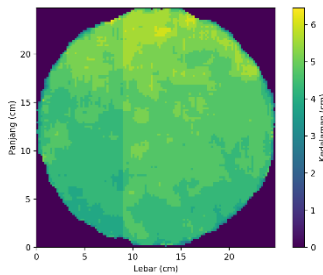
(b) Lubang berdiameter 10 Cm



(c) Lubang berdiameter 15 Cm



(d) Lubang berdiameter 20 Cm



(e) Lubang berdiameter 25 Cm

Gambar 4. 5 Lubang berkedalaman 4 cm

Pada lubang berkedalaman 4 cm nilai error luas tertinggi terjadi pada lubang berdiameter rendah (5 cm) yaitu 12,37 %. Namun nilai error luas hasil estimasi pada lubang lainnya menunjukkan nilai error yang rendah yaitu dibawah 3 %. Tingginya nilai error pada lubang berdiameter 5 cm dapat dilihat pada gambar diatas, bentuk yang terdeteksi oleh sistem tidak membentuk lingkaran sempurna.

Tabel 4.3 Luas aktual lubang berkedalaman 4 cm dan pembacaan alat

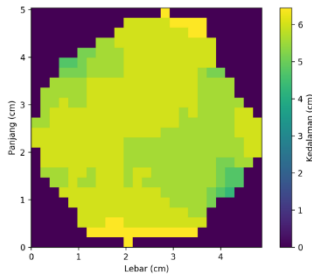
Dimensi aktual			Pembacaan alat		
Diameter (cm)	kedalaman (cm)	luas (cm ²)	Luas rata-rata (cm ²)	Error (%)	Standar deviasi
5.00	4.00	19.63	17.21	12.37	1.56
10.00	4.00	78.54	76.47	2.63	0.62
15.00	4.00	176.71	180.78	2.30	0.26
20.00	4.00	314.16	317.28	0.99	0.12
25.00	4.00	490.87	479.14	2.39	0.10

Nilai estimasi volume tertinggi pada lubang berkedalaman 4 cm terjadi pada lubang dengan diameter 5 cm yaitu mencapai 21.16 %. Terdapat lubang lain yang memiliki nilai error yang lebih dari 10 % yaitu lubang berdiameter 10 cm dan 25 cm yang masing-masing bernilai 13 % dan 14.4 %. Sedangkan lubang berdiameter 15 cm dan 20 cm meminiliki nilai kurang dari 10 %.

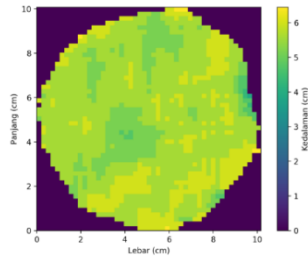
Tabel 4.4 Volume aktual lubang berkedalaman 4 cm dan pembacaan alat

Dimensi aktual			Pembacaan alat		
Diameter (cm)	kedalaman (cm)	Volume (cm ³)	Volume rata-rata (cm ³)	Error (%)	Standar deviasi
5.00	4.00	78.54	61.92	21.16	1.81
10.00	4.00	314.16	273.29	13.01	1.83
15.00	4.00	706.86	696.78	1.43	0.58
20.00	4.00	1256.64	1159.58	7.72	0.36
25.00	4.00	1963.50	2246.58	14.42	0.40

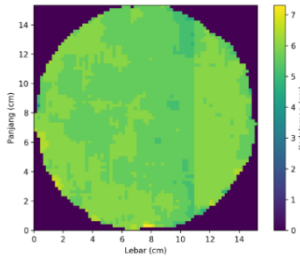
4.2.3 Lubang kedalaman 6 cm



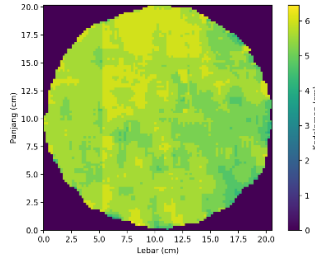
(a) Lubang berdiameter 5 Cm



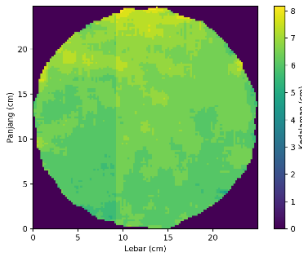
(b) Lubang berdiameter 10 Cm



(c) Lubang berdiameter 15 Cm



(d) Lubang berdiameter 20 Cm



(e) Lubang berdiameter 25 Cm

Gambar 4. 6 Lubang berkedalaman 6 cm

Luas lubang buatan berkedalaman 6 cm memiliki error kurang dari 10 % untuk setiap variasi diameter. Lubang berdiameter 5 cm memiliki error terbesar yaitu 8.84%, sedangkan

lubang lainnya memiliki nilai error estimasi luas dibawah 5 %

Tabel 4.5 Luas aktual lubang berkedalaman 6 cm dan pembacaan alat

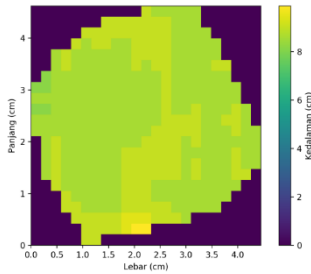
Dimensi aktual			Pembacaan alat		
Diameter (cm)	kedalaman (cm)	luas (cm ²)	Luas rata-rata (cm ²)	Error (%)	Standar deviasi
5.00	6.00	19.63	17.90	8.84	0.55
10.00	6.00	78.54	78.87	0.56	0.40
15.00	6.00	176.71	182.32	3.17	0.10
20.00	6.00	314.16	320.01	1.86	0.10
25.00	6.00	490.87	478.14	2.59	0.15

Volume lubang hasil estimasi memiliki nilai error terbesar pada lubang berdiameter 5 cm. sedangkan lubang lainnya memiliki nilai error dibawah 10 seperti pada tabel dibawah ini.

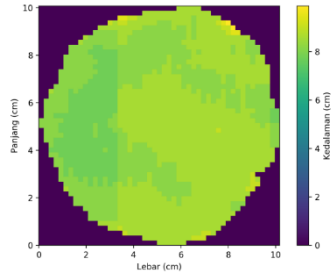
Tabel 4.6 Volume aktual lubang berkedalaman 6 cm dan pembacaan alat

Dimensi aktual			Pembacaan alat		
Diameter (cm)	kedalaman (cm)	Volume (cm ³)	Volume rata-rata (cm ³)	Error (%)	Standar deviasi
5.00	6.00	117.81	104.41	11.37	0.78
10.00	6.00	471.24	450.84	6.12	0.85
15.00	6.00	1060.29	1048.78	1.08	0.56
20.00	6.00	1884.96	1767.22	6.25	0.62
25.00	6.00	2945.24	3050.54	3.58	0.13

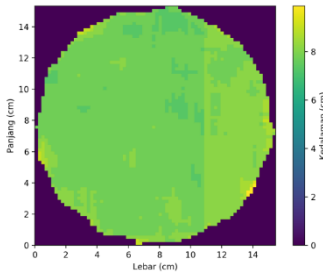
4.2.4 Lubang kedalaman 8 cm



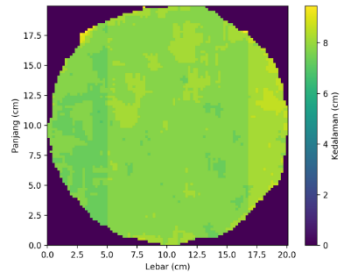
(a) Lubang berdiameter 5 Cm



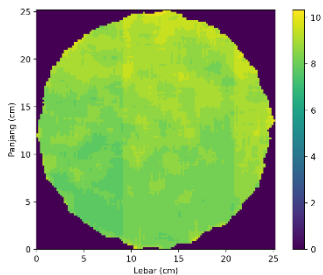
(b) Lubang berdiameter 10 Cm



(c) Lubang berdiameter 15 Cm



(d) Lubang berdiameter 20 Cm



(e) Lubang berdiameter 25 Cm

Gambar 4. 7 Lubang berkedalaman 8 cm

Luas hasil estimasi memiliki error yang rendah dengan nilai berkisar dibawah 5 % untuk lubang berdiameter diatas 5 cm.

sedangkan lubang berdiameter 5 cm memiliki nilai yang tinggi yaitu 17.6 %.

Tabel 4.7 Luas aktual lubang berkedalaman 8 cm dan pembacaan alat

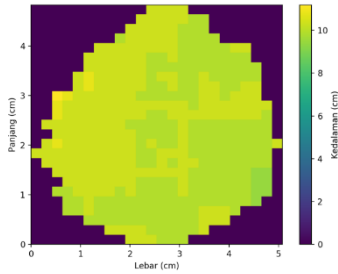
Dimensi aktual			Pembacaan alat		
Diameter (cm)	kedalaman (cm)	luas (cm ²)	Luas rata-rata (cm ²)	Error (%)	Standar deviasi
5.00	8.00	19.63	16.17	17.64	0.90
10.00	8.00	78.54	78.92	0.49	0.31
15.00	8.00	176.71	180.04	1.88	0.29
20.00	8.00	314.16	318.72	1.45	0.25
25.00	8.00	490.87	478.24	2.57	0.06

Volume hasil estimasi untuk lubang berdiameter 5 cm memiliki nilai yang tinggi yaitu 13.9 % dibandingkan dengan lubang lainnya. Sedangkan lubang lainnya memiliki nilai error yang rendah dibawah 5%.

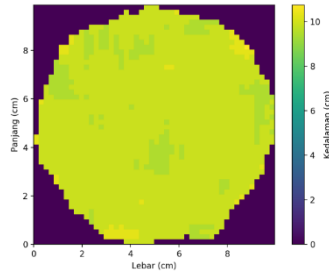
Tabel 4.8 Volume aktual lubang berkedalaman 8 cm dan pembacaan alat

Dimensi aktual			Pembacaan alat		
Diameter (cm)	kedalaman (cm)	Volume (cm ³)	Volume rata-rata (cm ³)	Error (%)	Standar deviasi
5.00	8.00	157.08	135.15	13.96	2.03
10.00	8.00	628.32	637.91	1.74	1.82
15.00	8.00	1413.72	1419.00	0.38	0.33
20.00	8.00	2513.27	2474.98	1.52	0.27
25.00	8.00	3926.99	4069.00	3.62	0.40

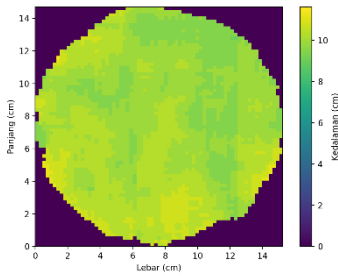
4.2.5 Lubang kedalaman 10 cm



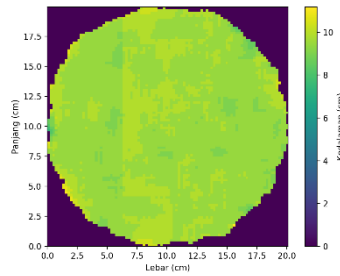
(a) Lubang berdiameter 5 Cm



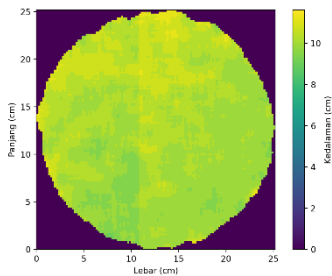
(b) Lubang berdiameter 10 Cm



(c) Lubang berdiameter 15 Cm



(d) Lubang berdiameter 20 Cm



(e) Lubang berdiameter 25 Cm

Gambar 4. 8 Lubang berkedalaman 10 cm

Luas lubang hasil estimasi untuk lubang berkedalaman 10 cm memiliki nilai error dibawah 10 %. Nilai error terbesar terjadi pada lubang berdiameter 5 cm yang dapat dilihat dari gambar diatas, terlihat bahwa bentuk yang dihasilkan tidak berupa lingkaran sempurna.

Tabel 4.9 Luas aktual lubang berkedalaman 10 cm dan pembacaan alat

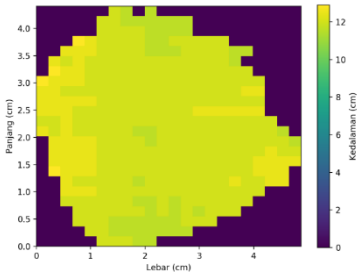
Dimensi aktual			Pembacaan alat		
Diameter (cm)	kedalaman (cm)	luas (cm ²)	Luas rata-rata (cm ²)	Error (%)	Standar deviasi
5.00	10.00	19.63	17.93	8.70	1.54
10.00	10.00	78.54	76.99	1.97	0.51
15.00	10.00	176.71	174.45	1.28	0.35
20.00	10.00	314.16	318.39	1.35	0.18
25.00	10.00	490.87	480.79	2.05	0.06

Volume lubang hasil estimasi pada lubang berkedalaman 10 cm memiliki nilai error tertinggi yaitu 6.97% pada lubang berdiameter 5 cm. sedangkan untuk lubang lainnya memiliki nilai error yang kurang dari 3 %.

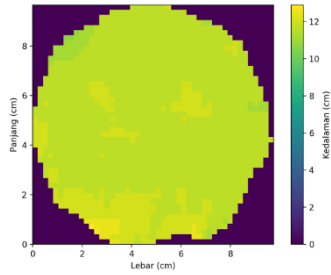
Tabel 4.10 Volume aktual lubang berkedalaman 10 cm dan pembacaan alat

Dimensi aktual			Pembacaan alat		
Diameter (cm)	kedalaman (cm)	Volume (cm ³)	Volume rata-rata (cm ³)	Error (%)	Standar deviasi
5.00	10.00	196.35	182.66	6.97	2.04
10.00	10.00	785.40	766.25	2.51	1.18
15.00	10.00	1767.15	1742.30	1.41	0.84
20.00	10.00	3141.59	3052.10	2.85	0.41
25.00	10.00	4908.74	4887.46	0.43	0.26

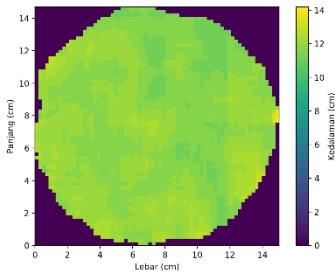
4.2.6 Lubang kedalaman 12 cm



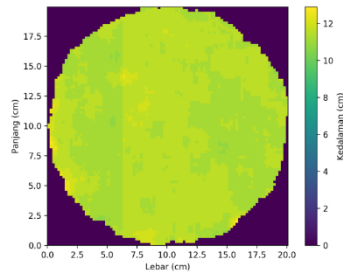
(a) Lubang berdiameter 5 Cm



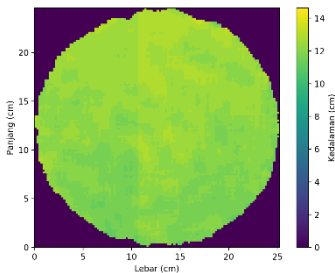
(b) Lubang berdiameter 10 Cm



(c) Lubang berdiameter 15 Cm



(d) Lubang berdiameter 20 Cm



(e) Lubang berdiameter 25 Cm

Gambar 4. 9 Lubang berkedalaman 12 cm

Luas hasil estimasi pada lubang berkedalaman 12 cm, memiliki nilai error tertinggi 15.1 % pada lubang berdiameter 5 cm

. sedangkan untuk lubang lainnya memiliki nilai error kurang dari 5 %.

Tabel 4.11 Luas aktual lubang berkedalaman 12 cm dan pembacaan alat

Dimensi aktual			Pembacaan alat		
Diameter (cm)	kedalaman (cm)	luas (cm ²)	Luas rata-rata (cm ²)	Error (%)	Standar deviasi
5.0	12.0	19.6	16.68	15.1	1.1
10.0	12.0	78.5	75.02	4.5	0.3
15.0	12.0	176.7	174.89	1.0	0.2
20.0	12.0	314.2	314.61	0.2	0.1
25.0	12.0	490.9	475.93	3.0	0.1

Nilai error estimasi volume pada lubang berkedalaman 12 cm memiliki nilai yang berbanding terbalik dengan diameter lubang. Nilai error tertinggi yaitu 14.7%.

Tabel 4. 12 Volume aktual lubang berkedalaman 12 cm dan pembacaan alat

Dimensi aktual			Pembacaan alat		
Diameter (cm)	kedalaman (cm)	Volume (cm ³)	Volume rata-rata (cm ³)	Error (%)	Standar deviasi
5.00	12.00	235.62	200.77	14.79	1.18
10.00	12.00	942.48	877.83	6.86	0.28
15.00	12.00	2120.58	2070.96	2.34	0.36
20.00	12.00	3769.91	3615.12	4.11	0.18
25.00	12.00	5890.49	5829.28	1.04	0.56

4.2.7 Nilai error hasil estimasi

Berikut merupakan kumpulan nilai error dari setiap variasi diameter dan kedalaman.

Tabel 4. 13 Nilai error dari hasil luas estimasi

		Kedalaman (cm)					
		2	4	6	8	10	12.00
Diameter (cm)	5	6.41	12.37	8.84	17.64	8.70	15.05
	10	1.68	2.63	0.56	0.49	1.97	4.48
	15	1.23	2.30	3.17	1.88	1.28	1.03
	20	3.16	0.99	1.86	1.45	1.35	0.15
	25	0.14	2.39	2.59	2.57	2.05	3.05

Berdasarkan tabel diatas, diketahui bahwa nilai error terbesar didapatkan pada lubang buatan berdiameter 5 cm untuk setiap variasi kedalaman. sedangkan untuk semua lubang buatan berdiameter lebih dari 5 cm memiliki nilai error kurang dari 5 %. Lubang jalan berdiameter 5 cm memili error yang meningkat terhadap kenaikan kedalaman, hal ini disebabkan karena cahaya balik dari permukaan dalam lubang tidak sepenuhnya diterima kembali oleh kamera inframerah karena sebagian terhalang oleh dinding lubang sehingga area yang tertangkap hanya sebagian yang terbaca. Adanya sebagian cahaya proyeksi yang terhalang dikarenakan letak proyektor dan kamera inframerah bersebelahan dengan jarak tertentu, sehingga cahaya proyeksi dan cahaya hasil pantulan tidak berada pada sumbu yang sama.

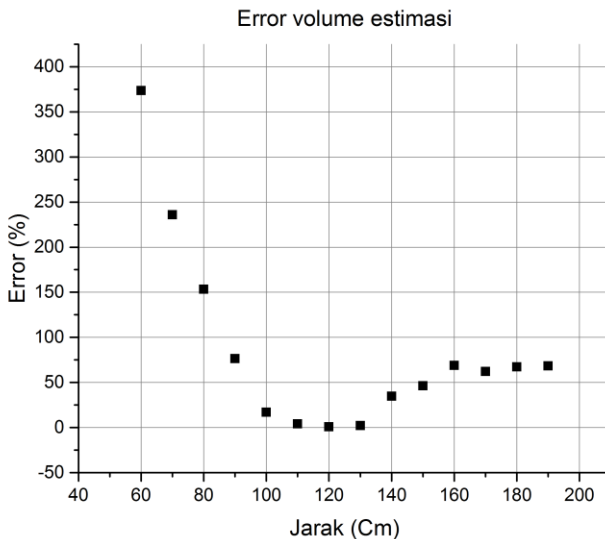
Tabel 4. 14 Nilai error dari hasil volume estimasi

		Kedalaman (cm)					
		2	4	6	8	10	12
Diameter (cm)	5	7.23	21.16	11.37	13.96	6.97	14.79
	10	6.79	13.01	6.12	1.74	2.51	6.86
	15	9.09	1.43	1.08	0.38	1.41	2.34
	20	2.37	7.72	6.25	1.52	2.85	4.11
	25	26.40	14.42	3.58	3.62	0.43	1.04

Berdasarkan tabel diatas, diketahui bahwa nilai error dari hasil estimasi volume memiliki nilai error besar terjadi pada lubang

berdiameter kecil (5 cm) dan lubang berdiameter besar (25 cm) yaitu 12.59% dan 8.25%., sedangkan untuk lubang berkedalam diantara 5 cm dan 25 cm memiliki nilai error kurang dari 7%. Jika dilihat dari tabel diatas lubang dengan nilai error yang kurang dari 7% adalah lubang dengan rentang diameter 10 cm sampai 25 cm dan memiliki kedalaman pada rentang 6 cm sampai 12 cm. pada lubang berkedalaman 2 cm dan 4 cm dengan diameter 25 cm memiliki error yang lebih besar dibandingkan dengan lubang lainnya, hal ini dikarenakan posisi lubang buatan yang tidak tegak lurus dengan sumbu pengamatan, seperti yang terlihat pada profil persebarah kedalaman, dimana bagian atas lubang terlihat lebih dalam dibandingkan dengan permukaan bagian bawah.

4.3 Pengaruh jarak sensor terhadap nilai error



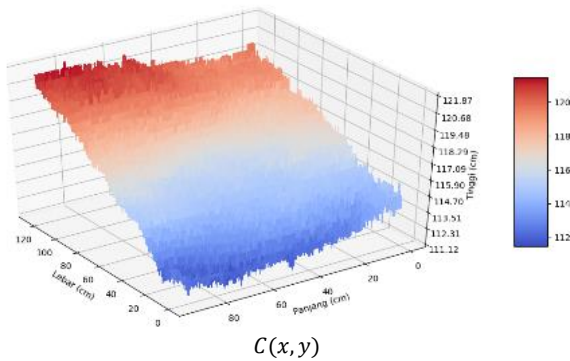
Gambar 4. 10 Pengaruh jarak terhadap nilai error

Error pembacaan volume yang dihasilkan oleh sistem diketahui bahwa nilai error kurang dari 10 % terjadi pada jarak 110 -130 cm. Hal ini dapat disebabkan karena rentang kerja sistem yang

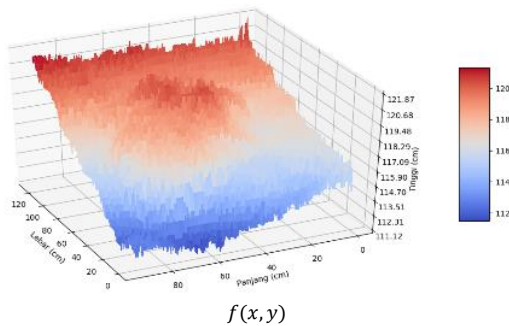
telah ditetapkan pada model matematis yang didapatkan dari proses karakterisasi adalah pada jarak 100-150 cm. Sehingga jarak sensor diluar rentang tersebut memiliki error yang tinggi. Adanya error yang lebih dari 10 % diluar rentang 110-130 cm dapat disebabkan oleh faktor distorsi kamera inframerah, hal ini dapat ditunjukkan pada grafik karakterisasi jarak yang tidak linier.

4.4 Pengujian lubang aktual

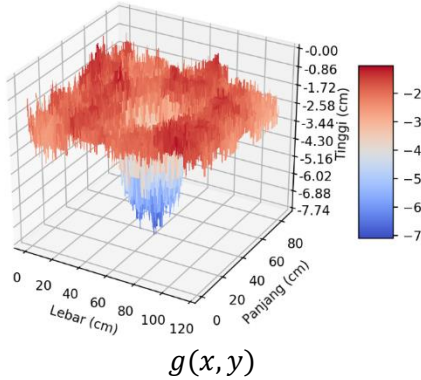
Pengujian dilakukan pada jalan berlubang sesungguhnya, terdapat 6 lubang yang menjadi sampel dalam uji coba sistem pada lubang jalan. Berikut ini merupakan rangkaian proses dalam mendapatkan bentuk serta ukuran lubang jalan.



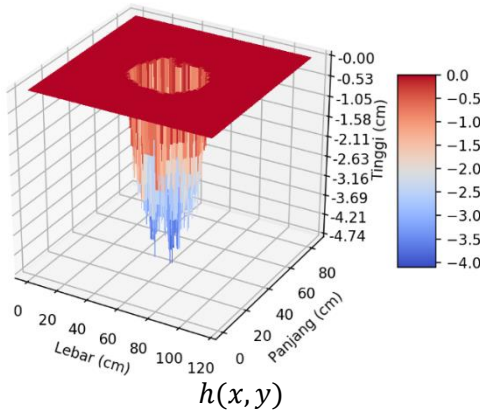
(a) Citra kedalaman referensi latar belakang (tanpa lubang)



(b) Citra kedalaman objek lubang



(c) Citra hasil normalisasi

(d) Citra hasil proses *thresholding***Gambar 4. 11** Proses deteksi citra lubang jalan

Berdasarkan gambar diatas diketahui bahwa citra hasil normalisasi $g(x,y)$ memiliki permukaan yang relatif datar pada bagian latar belakang citra, hal ini berbeda dengan citra asli lubang $f(x,y)$ yang memiliki bidang miring sebagai latar belakangnya. Citra hasil proses normalisasi dilanjutkan proses *thresholding* untuk memisahkan antara objek lubang jalan dengan latar belakangnya, hasil citra yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar diatas.

Tabel 4. 15 Hasil pengujian lubang aktual

Lubang Ke-	Luas (Cm ²)	Volume (Cm ³)	Panjang Bidang (Cm)	Kedalaman Maksimal (Cm)	Kondisi Kerusakan
1	933,9	61425,7	44,3	4,7	Rendah
2	2632,8	180752,2	68,4	5,7	Sedang
3	2147,0	116197,7	78,2	3,7	Rendah
4	5300,1	363794,7	93,2	5,2	Sedang
5	4138,5	342323,7	85,6	6,0	Sedang
6	1141,0	99740,1	68,6	5,5	Sedang

Pada tabel diatas merupakan hasil pengujian sistem yang dibuat dalam mendeteksi serta mengkuantifikasi lubang jalan aktual. Bersaran-besaran yang diestimasi adalah luas permukaan lubang, volume lubang, panjang bidang maksimum, kedalaman maksimal, dan kondisi kerusakan jalan berdasarkan standar yang sudah ada. Terdapat dua faktor dalam penentuan kondisi kerusakan jalan yaitu panjang bidang dan kedalaman maksimum. Lubang-lubang yang diujikan merukan lubang dengan panjang bidang lebih dari 15 cm, karena berdasarkan standar *Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation* cekungan pada jalan dikatakan berlubang ketika memiliki panjang bidang lebih dari 15 cm. Kedalaman lubang merupakan faktor yang menentukan tingkat kerusakan lubang jalan. Berdasarkan tabel diatas terdapat beberapa lubang jalan yang tergolong pada kerusakan tingkat rendah dan sedang.

Tabel 4. 16 Posisi lubang jalan aktual

Lubang ke-	Modul GPS
1	7°17'13.6"S 112°47'49.6"E
2	7°17'13.8"S 112°47'47.5"E
3	7°17'12.6"S 112°47'47.3"E
4	7°17'11.5"S 112°47'47.2"E
5	7°17'11.4"S 112°47'47.3"E
6	7°17'09.8"S 112°47'51.7"E

Dari tabel 4.16 dapat diketahui bahwa dengan menggunakan modul GPS, sistem dapat menentukan posisi lubang dalam bentuk bujur dan lintang. Format posisi bujur dan lintang lubang jalan yang dihasilkan yaitu sudut, menit, serta detik dalam bentuk desimal.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil data yang telah didapatkan serta proses analisa data yang telah dilakukan, maka dapat dirumuskan beberapa kesimpulan pada tugas akhir ini, yaitu:

1. Telah berhasil dirancang sistem monitoring kerusakan jalan berbasis sensor Kinect, yang mampu deteksi sekaligus mengkuatifikasi kondisi lubang jalan. Sistem terpasang pada bagian belakang mobil dengan ketinggian 120 cm dari permukaan jalan, dan terhubung dengan modul GPS untuk menentukan lokasi lubang yang terdeteksi.
2. Rentang pengukuran yang dipilih yaitu 110 cm – 130 cm. Rentang ini dipilih karena memiliki error pembacaan kurang dari 10%. Resolusi kedalaman terkecil yang dapat terbaca sistem adalah 0.43 cm.
3. Resolusi spasial pada sistem ini bergantung pada jarak objek dengan sensor kinect. Pada jarak 120 cm antara objek dengan sensor kinect, resolusi spasial terdiri atas resolusi disumbu horizontal (lx) dan sumbu vertikal (ly). Dengan resolusi masing masing adalah 0.21 cm dan 0.22 cm.
4. Validasi luasan lubang diketahui bahwa, lubang dengan ukuran diameter 5 cm memiliki error lebih dari 5 % sedangkan pada lubang berdiameter lebih besar diketahui memiliki error dibawah 5 %.
5. Pada validasi volume nilai error yang dihasilkan bergantung pada panjang diameter dan kedalaman lubang. Lubang dengan diameter kecil (5 cm) dan lubang berdiameter besar (25 cm) memiliki error lebih dari 8 %, sedangkan lubang berdiameter diantaranya serta memiliki kedalaman diantara 6-12 cm memiliki error kurang dari 7%.

6. Posisi lubang ditentukan oleh rangkaian modul GSM dan Arduino uno yang terhubung dengan perangkat lunak yang telah dibuat. Posisi yang dihasilkan oleh sistem yang telah dibuat dalam bentuk bujur dan lintang.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk penelitian sejenis kedepannya, yaitu:

1. Sistem pengamatan dibuat tidak hanya tegak lurus terhadap permukaan jalan.
2. Dilakukan penelitian yang lebih lanjut untuk algoritma yang sesuai jika sistem pembacaan dilakukan secara berjalan.
3. Digunakan filter yang dapat menghalangi sebagian cahaya inframerah dari matahari.

DAFTAR PUSTAKA

- Andersen, M. R. *et al.* (2012) ‘Kinect Depth Sensor Evaluation for Computer Vision Applications’, *Electrical and Computer Engineering*, Technical, p. 37. doi: Technical Report ECE-TR-6.
- Bianchini, A. *et al.* (2010) ‘Interrater Reliability of Manual Pavement Distress Evaluations’, 136(February), pp. 165–172.
- Eriksson, J. *et al.* (2008) ‘The Pothole Patrol : Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring’.
- Filko, D., Cupec, R. and Nyarko, E. K. (2016) ‘Detection , reconstruction and segmentation of chronic wounds using Kinect v2 sensor’, *Procedia - Procedia Computer Science*. The Author(s), 90(July), pp. 151–156. doi: 10.1016/j.procs.2016.07.022.
- Franco, J. M. *et al.* (2017) ‘Static and dynamic displacement measurements of structural elements using low cost RGB-D cameras’, *Engineering Structures*. Elsevier, 153(February), pp. 97–105. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.10.018.
- Goh, T. Y. *et al.* (2018) ‘Performance analysis of image thresholding : Otsu technique’, *Measurement*. Elsevier, 114(September 2017), pp. 298–307. doi: 10.1016/j.measurement.2017.09.052.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. (2002) *Digital Image Processing (2nd edition)*. 2nd edn. Prentice Hall.
- Kamal, K. *et al.* (2016) ‘Performance assessment of Kinect as a sensor for pothole imaging and metrology*’, *International Journal of Pavement Engineering*, 8436(June), pp. 1–12. doi: 10.1080/10298436.2016.1187730.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2016) *Buku Induk Statistik*. Jakarta.
- Koch, C. (2011) ‘Improving Pothole Recognition through Vision Tracking for Automated Pavement Assessment’,

- (December 2014).
- Kumagai, S. *et al.* (2016) 'Markerless Respiratory Motion Tracking Using Single Depth Camera', *Open Journal of Medical Imaging*, (March), pp. 20–31.
- McCormick, N. and Lord, J. (2010) 'Digital image correlation', *Materials Today*. Elsevier Ltd, 13(12), pp. 52–54. doi: 10.1016/S1369-7021(10)70235-2.
- Van Mieghem, B., Ivens, J. and Van Bael, A. (2017) 'Benchmarking of depth of field for large out-of-plane deformations with single camera digital image correlation', *Optics and Lasers in Engineering*. Elsevier, 91(December 2016), pp. 134–143. doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.11.019.
- Patil, A. B. and A, J. (2016) 'OTSU Thresholding Method for Flower Image Segmentation', pp. 1–6.
- Ryu, S., Kim, T. and Kim, Y. (2015) 'Image-Based Pothole Detection System for ITS Service and Road Management System', 2015.
- Sarbolandi, H., Lefloch, D. and Kolb, A. (2015) 'Kinect range sensing : Structured-light versus Time-of-Flight Kinect ☆', *Computer Vision and Image Understanding*. Elsevier Ltd., 139, pp. 1–20. doi: 10.1016/j.cviu.2015.05.006.
- Shen, H. *et al.* (2015) 'Obtaining four-dimensional vibration information for vibrating surfaces with a Kinect sensor', *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. Elsevier Ltd, 65, pp. 149–165. doi: 10.1016/j.measurement.2014.12.019.
- Vala, M. H. J. and Baxi, A. (2013) 'A review on Otsu image segmentation algorithm', *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering and Technology*, 2(2), pp. 387–389.
- Vera, L. *et al.* (2011) 'Augmented Mirror: Interactive Augmented Reality System Based on Kinect BT - Human-Computer Interaction – INTERACT 2011: 13th IFIP TC 13 International Conference, Lisbon, Portugal,

- September 5-9, 2011, Proceedings, Part IV', in Campos, P. et al. (eds). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 483–486. doi: 10.1007/978-3-642-23768-3_63.
- Vupparaboina, K. K. *et al.* (2015) 'Laser-based Detection and Depth Estimation of Dry and Water-Filled Potholes: A Geometric Approach'.
- Wang, P. *et al.* (2017) 'Asphalt Pavement Pothole Detection and Segmentation Based on Wavelet Energy Field', 2017.
- Yuminaka, Y. . *et al.* (2016) 'Non-contact vital sensing systems using a motion capture device: Medical and healthcare applications', *Key Engineering Materials*, 698, pp. 171–176. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.698.171.
- Zhang, Xiao Ai and Chan (2014) 'AN EFFICIENT ALGORITHM FOR POTHOLE DETECTION USING STEREO VISION Zhen Zhang , Xiao Ai , C . K . Chan and Naim Dahnoun Department of Electrical and Electronic Engineering University of Bristol Merchant Venturers Building Woodland Road , Bristol BS8 1UB , U', pp. 564–568.

LAMPIRAN A SPESIFIKASI ALAT

A.1 Spesifikasi Microsoft Kinect

<i>Field of View</i>	<i>58° H, 45° V</i>
<i>Distance of Use</i>	<i>0,8 – 3,5 m</i>
<i>Sensor</i>	<i>RGB & Depth</i>
<i>Image Size</i>	<i>VGA (640x480) 60fps</i>
<i>Dimension</i>	<i>18 x 3,5 x 5 cm</i>
<i>Audio Capture</i>	<i>4-mic array (48 KHz)</i>
<i>Tilt Motor</i>	<i>Vertical</i>
<i>Laser Speckle</i>	<i>830 nm laser diode (60mW)</i>
<i>Vertical Tilt Range</i>	<i>± 27°</i>
<i>Audio Format</i>	<i>16 kHz, 24-bit mono code modulation (PCM)</i>
<i>Audio Input Characteristic</i>	<i>\$ microphone array with 24-bit analog-to-digital converter (ADC) and Kinect-resident signal processing including acoustic echo cancellation and noise suppression</i>
<i>Accelerometer Characteristic</i>	<i>A 2G/4G/8G accelerometer configured for the 2G range, with a 1° accuracy upper limit</i>

A.2 Spesifikasi GSM/GPRS/GPS Shield (B), Arduino Shield Based on SIM808



Gambar. GSM/GPRS/GPS Shield (B), Arduino Shield Based on SIM808

General :

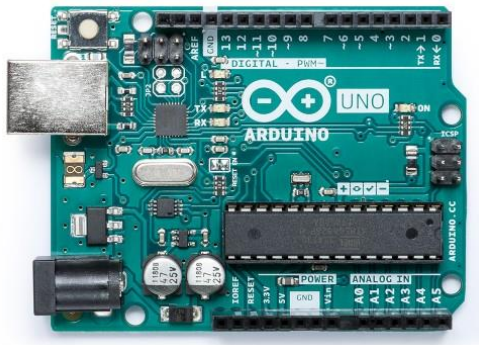
- Arduino connectivity, compatible with UNO, Leonardo, NUCLEO, XNUCLEO
- Onboard USB TO UART converter CP2102 for UART debugging
- x LEDs for indicating the module working status
- Onboard voltage level converter, supports both 3.3V and 5V systems
- SIM card slot for 1.8V/3V SIM card
- Baudrate auto detection (1200bps ~115200bps)
- Bluetooth 3.0 , supports data transferring through Bluetooth
- RTC with power supply interface
- Firmware upgradable via USB
- Control via AT commands (3GPP TS 27.007,27.005, and SIMCOM enhanced AT Commands)
- Supports SIM application toolkit: GSM 11.14 Release 99
- Operating voltage: 6 ~ 12V
- Operation temperature: -40 °C ~ +85 °C

- Storage temperature: $-45^{\circ}\text{C} \sim +90^{\circ}\text{C}$

GPS :

- Receiver type
 - 22 tracking channels
 - 66 acquisition channels
 - GPS L1 C/A code
- Sensitivity
 - Tracking: -165 dBm
 - Cold starts : -148 dBm
- Time-To-First-Fix
 - Cold starts : 30s (typ.)
 - Hot starts : $< 1\text{ s}$
 - Warm starts: 28s
- Accuracy
 - Horizontal position : $< 2.5\text{ m CEP}$

A.3 Spesifikasi Arduino UNO Rev 3



Gambar. Arduino UNO Rev 3

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V

Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

LAMPIRAN B

VALIDASI SISTEM

B.1 Lubang berkedalaman 2 cm

Secara matematis luas dan volume dari lubang berkedalaman 2 cm untuk beberapa variasi diameter adalah sebagai berikut:

Aktual			
diameter (cm)	kedalaman (cm)	luas (cm ²)	Volume (cm ³)
5,00	2,00	19,63	39,27
10,00	2,00	78,54	157,08
15,00	2,00	176,71	353,43
20,00	2,00	314,16	628,32
25,00	2,00	490,87	981,75

Proses validasi dilakukan sebanyak 5 kali pengujian pada setiap variasi lubang, berikut merupakan hasil serta error terhadap lubang aktual yang telah diketahui

Percobaan 1	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	18,47566	5,904234	33,93615	13,58231
	76,16769	3,020289	129,8435	17,33907
	176,5847	0,073513	296,9843	15,97065
	303,7381	3,317166	471,2293	25,00153
	491,1594	0,058181	1013,558	3,240201
Percobaan 2	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	18,279	6,905794	41,40724	5,442681
	75,8093	3,476599	162,8951	3,702224
	176,2114	0,284762	371,1843	5,023682
	301,2504	4,109032	595,6872	5,193445
	487,0428	0,780465	1216,568	23,9186

Percobaan 3	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	22,96134	16,94113	37,54556	4,391011
	85,58317	8,967874	141,5884	9,862024
	190,0861	7,566741	311,6702	11,81538
	321,5476	2,351765	492,5802	21,60343
	512,6108	4,428205	1036,647	5,592007
Percobaan 4	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	22,51721	14,67922	36,78166	6,33626
	84,6505	7,780367	139,7741	11,01702
	190,0861	7,566741	309,5313	12,42057
	322,6135	2,691053	490,3076	21,96512
	510,9675	4,093441	1029,829	4,897553
Percobaan 5	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	21,94364	11,75802	45,7739	16,56227
	84,72804	7,879096	177,0392	12,70667
	189,1038	7,010866	387,265	9,57358
	320,4124	1,990437	623,5768	0,754675
	508,5449	3,59991	1243,964	26,70913

B.2 Lubang berkedalaman 4 cm

Secara matematis luas dan volume dari lubang berkedalaman 4 cm untuk beberapa variasi diameter adalah sebagai berikut:

Aktual			
diameter (cm)	kedalaman (cm)	luas (cm ²)	Volume (cm ³)
5,00	4,00	19,63	78,54
10,00	4,00	78,54	314,16
15,00	4,00	176,71	706,86

20,00	4,00	314,16	1256,64
25,00	4,00	490,87	1963,50

Proses validasi dilakukan sebanyak 5 kali pengujian pada setiap variasi lubang, berikut merupakan hasil serta error terhadap lubang aktual yang telah diketahui

Percobaan 1	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	17,44011	11,17823	63,04058	19,73424
	76,86895	2,127407	269,6778	14,1589
	181,7745	2,863352	702,6382	0,59703
	319,8826	1,821788	1169,799	6,910348
	482,4509	1,715904	2258,967	15,04822
Percobaan 2	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	17,33813	11,69761	63,04058	19,73424
	76,41947	2,699707	269,6778	14,1589
	180,7116	2,261868	702,6382	0,59703
	318,0121	1,226396	1169,799	6,910348
	479,6298	2,29061	2258,967	15,04822
Percobaan 3	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	19,75488	0,610781	69,30024	11,76419
	82,34076	4,83951	254,9083	18,86018
	191,3808	8,299378	684,2151	3,20337
	323,5401	2,986009	1031,618	17,90641
	492,7074	0,373533	1758,387	10,44606
Percobaan 4	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	19,55942	0,384702	57,73472	26,48987
	83,44763	6,248823	248,0068	21,05698

	190,2959	7,685462	635,8034	10,05222
	331,8478	5,630443	1035,2	17,62139
	556,9357	13,458	2115,87	7,760389
Percobaan 5	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	17,16256	12,59181	62,17235	20,8397
	77,20956	1,693731	283,475	9,767112
	181,1506	2,510258	698,4103	1,195151
	317,4854	1,058733	1151,774	8,344738
	479,1909	2,38003	2240,017	14,08311

B.3 Lubang berkedalaman 6 cm

Secara matematis luas dan volume dari lubang berkedalaman 6 cm untuk beberapa variasi diameter adalah sebagai berikut:

Aktual			
diameter (cm)	kedalaman (cm)	luas (cm ²)	Volume (cm ³)
5,00	6,00	19,63	117,81
10,00	6,00	78,54	471,24
15,00	6,00	176,71	1060,29
20,00	6,00	314,16	1884,96
25,00	6,00	490,87	2945,24

Proses validasi dilakukan sebanyak 5 kali pengujian pada setiap variasi lubang, berikut merupakan hasil serta error terhadap lubang aktual yang telah diketahui

Percobaan 1	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	18,14655	7,580389	98,61037	16,29692
	78,72335	0,233678	408,073	13,40421
	183,364	3,762813	965,3716	8,951901
	321,5604	2,355843	1628,077	13,62781

	481,9653	1,814845	2855,049	3,062352
Percobaan 2	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	18,01409	8,254985	96,84473	17,79564
	79,95961	1,807734	460,9095	2,191962
	183,1433	3,637887	974,3897	8,101369
	322,0902	2,524492	1632,406	13,39817
	479,7135	2,27357	2859,663	2,905711
Percobaan 3	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	17,88164	8,929581	96,38908	18,18241
	79,16487	0,795841	407,7883	13,46464
	183,364	3,762813	980,4461	7,530169
	321,5604	2,355843	1634,324	13,29644
	481,2588	1,958758	2863,555	2,773565
Percobaan 4	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	18,1024	7,805254	98,02182	16,79649
	79,16487	0,795841	409,478	13,10608
	183,7172	3,962693	981,9459	7,388712
	321,9136	2,468276	1639,981	12,99629
	480,5524	2,102672	2866,175	2,684608
Percobaan 5	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	17,88164	8,929581	96,54096	18,05349
	79,65054	1,41422	410,6551	12,85629
	183,364	3,762813	978,3197	7,730716
	322,3551	2,608817	1661,188	11,87124
	481,2588	1,958758	2863,916	2,761317

B.4 Lubang berkedalaman 8 cm

Secara matematis luas dan volume dari lubang berkedalaman 8 cm untuk beberapa variasi diameter adalah sebagai berikut:

Aktual			
diameter (cm)	kedalaman (cm)	luas (cm ²)	Volume (cm ³)
5,00	8,00	19,63	157,08
10,00	8,00	78,54	628,32
15,00	8,00	176,71	1413,72
20,00	8,00	314,16	2513,27
25,00	8,00	490,87	3926,99

Proses validasi dilakukan sebanyak 5 kali pengujian pada setiap variasi lubang, berikut merupakan hasil serta error terhadap lubang aktual yang telah diketahui

Percobaan 1	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	16,20385	17,47446	134,7397	14,22206
	79,69469	1,470436	631,3418	0,48117
	181,2889	2,588516	1344,929	4,865766
	319,7501	1,779626	2355,334	6,284252
	480,9498	2,021721	3896,818	0,768333
Percobaan 2	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	16,38046	16,575	128,0568	18,47652
	79,47393	1,189355	604,7052	3,758172
	181,2889	2,588516	1354,915	4,159377
	320,4124	1,990437	2349,809	6,504075
	481,4354	1,92278	3904,033	0,584618
Percobaan 3	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	16,51292	15,9004	129,7085	17,42499

	79,56224	1,301787	606,376	3,492269
	180,0968	1,913921	1344,454	4,89934
	320,6332	2,060708	2356,928	6,220798
	480,729	2,066694	3894,711	0,821997
Percobaan 4	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	15,98309	18,59879	125,7785	19,9269
	79,07656	0,683408	600,6424	4,4048
	181,2447	2,563531	1348,384	4,62135
	322,046	2,510438	2357,042	6,216265
	481,4354	1,92278	3870,751	1,432124
Percobaan 5	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	16,248	17,24959	126,481	19,4797
	79,12072	0,739624	594,567	5,371721
	181,5979	2,763411	1354,668	4,176835
	320,1475	1,906113	2339,31	6,921815
	480,729	2,066694	3864,107	1,601335

B.5 Lubang berkedalaman 10 cm

Secara matematis luas dan volume dari lubang berkedalaman 10 cm untuk beberapa variasi diameter adalah sebagai berikut:

Aktual			
diameter (cm)	kedalaman (cm)	luas (cm ²)	Volume (cm ³)
5,00	10,00	19,63	196,35
10,00	10,00	78,54	785,40
15,00	10,00	176,71	1767,15
20,00	10,00	314,16	3141,59
25,00	10,00	490,87	4908,74

Proses validasi dilakukan sebanyak 5 kali pengujian pada setiap variasi lubang, berikut merupakan hasil serta error terhadap lubang aktual yang telah diketahui

Percobaan 1	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	18,28	6,91	176,98	9,86
	77,53	1,28	730,83	6,95
	175,50	0,68	1683,86	4,71
	319,71	1,77	2916,33	7,17
	484,00	1,40	4704,16	4,17
Percobaan 2	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	18,28	6,91	175,73	10,50
	77,88	0,83	733,81	6,57
	175,64	0,61	1678,90	4,99
	320,06	1,88	2932,95	6,64
	483,51	1,50	4704,88	4,15
Percobaan 3	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	18,28	6,91	174,57	11,09
	77,84	0,89	733,84	6,56
	176,39	0,18	1696,41	4,00
	321,30	2,27	2941,17	6,38
	483,55	1,49	4713,50	3,98
Percobaan 4	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	17,71	9,83	182,53	7,04
	77,09	1,85	758,20	3,46
	174,45	1,28	1651,66	6,54
	319,88	1,82	2951,10	6,06
	483,11	1,58	4729,27	3,66

Percobaan 5	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	17,62	10,28	170,07	13,38
	76,87	2,13	730,62	6,97
	175,42	0,73	1674,65	5,23
	320,37	1,98	2920,13	7,05
	483,91	1,42	4689,44	4,47

B.6 Lubang berkedalaman 12 cm

Secara matematis luas dan volume dari lubang berkedalaman 12 cm untuk beberapa variasi diameter adalah sebagai berikut:

Aktual			
diameter (cm)	kedalaman (cm)	luas (cm ²)	Volume (cm ³)
5,00	12,00	19,63	235,62
10,00	12,00	78,54	942,48
15,00	12,00	176,71	2120,58
20,00	12,00	314,16	3769,91
25,00	12,00	490,87	5890,49

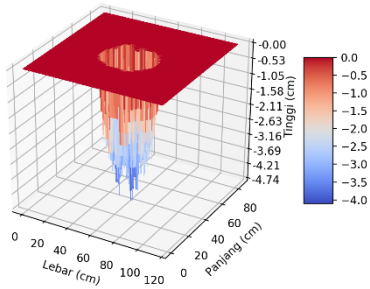
Proses validasi dilakukan sebanyak 5 kali pengujian pada setiap variasi lubang, berikut merupakan hasil serta error terhadap lubang aktual yang telah diketahui

Percobaan 1	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	16,95444	13,65175	197,7713	16,06324
	75,14702	4,319843	848,4213	9,979701
	176,1231	0,334732	1998,388	5,761958
	317,3218	1,006652	3505,035	7,026061
	478,7421	2,471451	5677,615	3,613819
Percobaan 2	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)

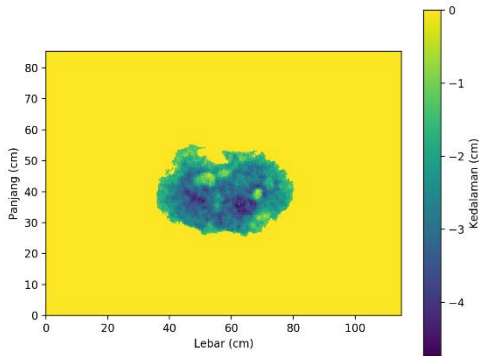
	16,46877	16,12527	191,639	18,66587
	75,32363	4,094978	847,3961	10,08848
	175,5491	0,659537	1998,825	5,741366
	316,3946	0,711516	3488,195	7,472758
	478,1682	2,588381	5619,197	4,605557
Percobaan 3	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	17,0869	12,97715	197,5245	16,16799
	75,58854	3,75768	850,9084	9,715813
	175,9906	0,409687	2009,305	5,247163
	316,1296	0,627192	3497,612	7,222971
	478,3448	2,552403	5631,955	4,388967
Percobaan 4	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	16,60122	15,45067	191,62	18,67393
	75,85345	3,420382	854,6865	9,314943
	176,3438	0,209807	2014,773	4,989317
	316,527	0,753678	3505,282	7,019514
	479,4927	2,318543	5648,719	4,10437
Percobaan 5	luas (cm ²)	error(%)	volume (cm ³)	error(%)
	16,77783	14,55121	195,1134	17,19132
	75,41193	3,982546	851,2881	9,675524
	175,5932	0,634552	2016,197	4,92217
	315,9089	0,556921	3505,434	7,015486
	478,8746	2,444467	5711,067	3,045914

LAMPIRAN C PENGUJIAN LUBANG JALAN

C.1 Lubang 1



Lubang 1 (estimasi)

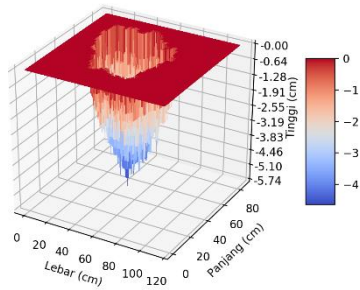


Lubang 1 (estimasi)

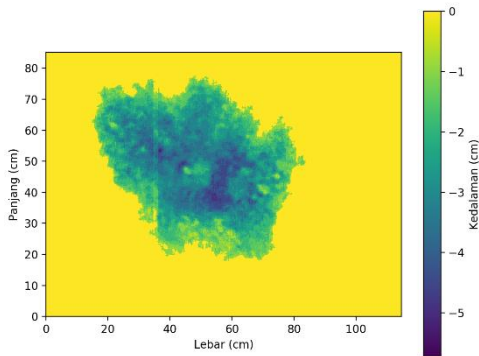


Lubang 1 (aktual)

C.2 Lubang 2



Lubang 2 (estimasi)

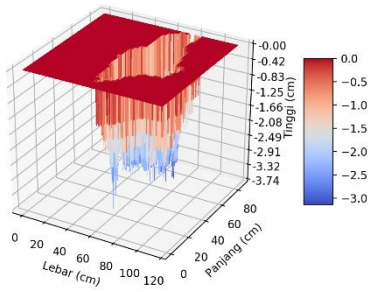


Lubang 2 (estimasi)

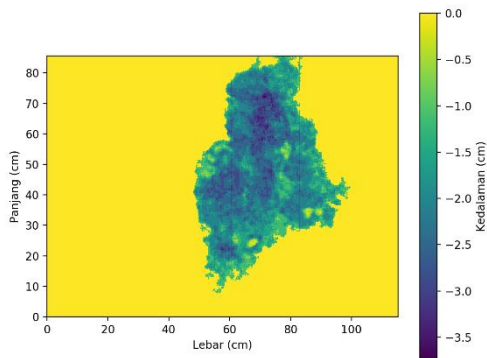


Lubang 2 (aktual)

C.3 Lubang 3



Lubang 3 (estimasi)

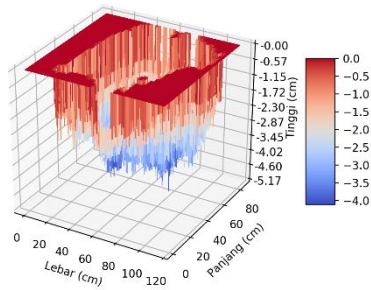


Lubang 3 (estimasi)

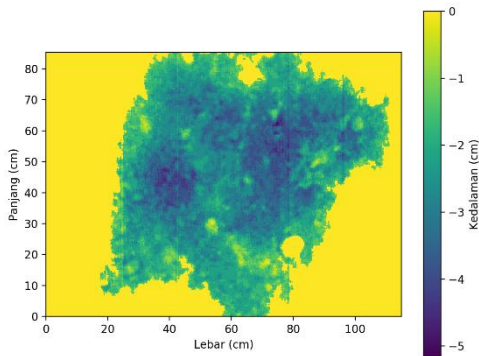


Lubang 3 (aktual)

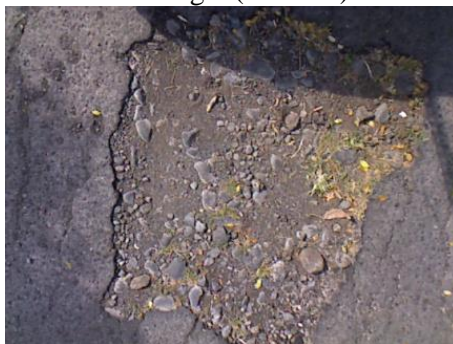
C.4 Lubang 4



Lubang 4 (estimasi)

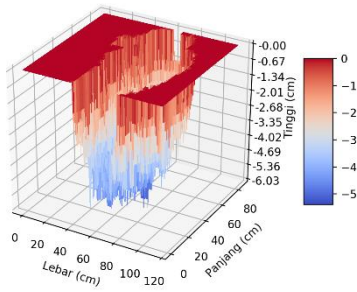


Lubang 4 (estimasi)

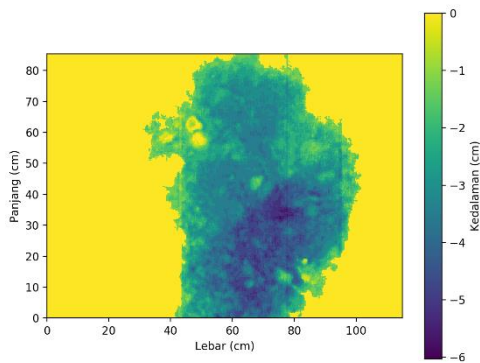


Lubang 4 (aktual)

C.5 Lubang 5



Lubang 5 (estimasi)

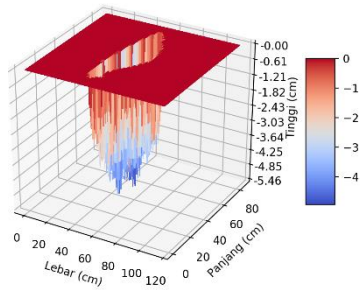


Lubang 5 (estimasi)

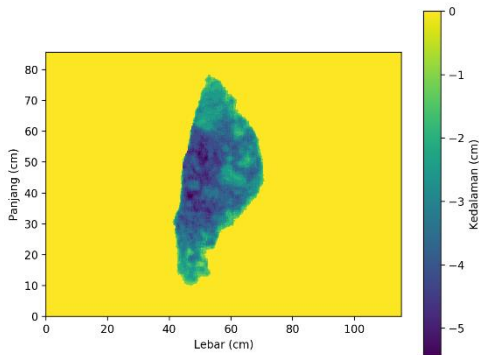


Lubang 5 (aktual)

C.6 Lubang 6



Lubang 6 (estimasi)



Lubang 6 (estimasi)



Lubang 6 (aktual)

BIODATA PENULIS



Nama penulis Wahyu Anggoro dilahirkan di Tanjung karang, tanggal 13 Februari 1996. Saat ini penulis tinggal di Implasment PTPN VII Rejosari, Natar, Lampung Selatan, Lampung. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN 4 Rejosari, Natar pada tahun 2008, pendidikan di SMPN 1 Natar pada tahun 2011, pendidikan di MA Alfatah Natar pada tahun 2014 dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang.

Pada bulan Juli 2018 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **rancang bangun sistem deteksi lubang jalan berbasis image correlation dengan menggunakan sensor kinect**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui *email*: anggorow9@gmail.com